2809395827

No 1583/D

21

70

THE INSTITUTE
OF
OPHTHALMOLOGY
LONDON

EX LIBRIS

THE INSTITUTE
OF
OPHTHALMOLOGY
LONDON
PRESENTED BY
SIR JOHN HERBERT PARSONS

OPHTHALMOLOGY HC524 NAGEL (3)

Digitized by the Internet Archive
in 2014

https://archive.org/details/b21286711_1

HANDBUCH

DER

PHYSIOLOGIE DES MENSCHEN

IN VIER BÄNDEN

BEARBEITET VON

CHR. BOHR-Kopenhagen, R. DU BOIS-REYMOND-Berlin, H. BORUTTAU-Göttingen, O. COHNHEIM-Heidelberg, M. CREMER-München, O. FRANK-München, M. VON FREY-Würzburg, A. GÜRBER-Würzburg, F. B. HOFMANN-Leipzig, J. VON KRIES-Freiburg i. Br., O. LANGENDORFF-Rostock, R. METZNER-Basel, W. NAGEL-Berlin, E. OVERTON-Würzburg, J. PAWLOW-St. Petersburg, K. L. SCHAEFER-Berlin, FR. SCHENCK-Marburg, P. SCHULTZ-Berlin, H. SELLHEIM-Freiburg i. Br., T. THUNBERG-Upsala, R. TIGERSTEDT-Helsingfors, A. TSCHERMAK-Halle, E. WEINLAND-München, O. WEISS-Königsberg, O. ZOTH-Graz

HERAUSGEGEBEN VON

W. NAGEL

IN BERLIN

MIT ZAHLREICHEN EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

DRITTER BAND

PHYSIOLOGIE DER SINNE

BRAUNSCHWEIG

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN

1905

HANDBUCH

DER

PHYSIOLOGIE DES MENSCHEN

HERAUSGEGEBEN VON

W. NAGEL
IN BERLIN

DRITTER BAND

PHYSIOLOGIE DER SINNE

BEARBEITET VON

J. VON KRIES-FREIBURG I. BR., W. NAGEL-BERLIN,
K. L. SCHAEFER-BERLIN, FR. SCHENCK-MARBURG, T. THUNBERG-UPSALA,
O. WEISS-KÖNIGSBERG, O. ZOTH-GRAZ

MIT 134 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN UND 2 TAFELN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1905

Alle Rechte, namentlich dasjenige der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten

1803274

b) Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen.

Physikalisch bedeutet jede beliebig kleine Veränderung der Schwingungszahl eine Erhöhung oder Vertiefung des Tones, nicht jedoch für das Ohr. Solange nicht die Differenz der Schwingungszahlen zweier Töne ein gewisses Minimum überschreitet, erscheinen beide Töne in der Empfindung gleich. Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen hat also eine Grenze.

Wie Preyer[1]) berichtet, war Delezenne (1826) der erste, der die kleinste noch wahrnehmbare Differenz zweier Tonhöhen zu bestimmen suchte. Er bediente sich hierzu einer metallenen Saite, die 120 Doppelschwingungen in der Sekunde machte. Wurde dieselbe durch einen Steg so in zwei Teile geteilt, daß der Steg 1 mm von der genauen Mitte entfernt war, so erschien für sehr geübte Ohren der Ton der einen Saitenhälfte bereits merklich verschieden von dem der anderen. Bei dieser Beobachtung, die Preyer (gleich anderen) irrtümlich interpretierte, betrug nach Stumpfs[2]) Berechnung der Tonhöhenunterschied 0,8 Schwingungen. Seebeck (1846) bemerkte im Verein mit zwei anderen musikalischen Personen jedesmal den Unterschied zwischen zwei Stimmgabeln, von denen die eine 439,636 und die andere 440 Schwingungen in der Sekunde vollführte. Abgesehen von diesen beiden und einigen weiteren, zum Teil nicht eindeutigen, Angaben ist seitens der älteren Forscher kein Material zur Beantwortung der Frage nach der Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit gesammelt worden.

Erst Preyer selbst hat systematische Versuche angestellt. Der speziell hierfür von Appunn in Hanau gebaute Tondifferenzapparat war einer jener Zungenkasten, welche die genannte Instrumentenfirma zu verschiedenen Zwecken für mehrere Akustiker verfertigt hat und deren Konstruktionsprinzip das folgende ist. Eine Reihe von Metallzungen sind in horizontaler Lage nebeneinander im Innern eines Kastens angebracht, dessen oberer hohler Teil von einem Blasebalge aus mit Druckluft gefüllt wird. Zu jeder Zunge gehört ein Ventilschieber. Wird derselbe herausgezogen, so kann die Preßluft an der Zunge vorbeistreichen und setzt sie in Bewegung; wird er zurückgeschoben, so erlischt der Ton momentan. Dank der Wahl dieser Einrichtung erhielt Preyer Töne, die einander an Intensität und Klangfarbe genügend gleich waren. Es war nur nötig, die von der Versuchsperson zu vergleichenden zwei Töne hinsichtlich ihrer Dauer und der Zwischenpause genau zu regulieren sowie von Zeit zu Zeit die Schwingungszahlen durch Zählung der Schwebungen einer Kontrolle zu unterziehen. Durch mehr als 1000 Einzelversuche überzeugte sich Preyer davon, daß musikalische und äußerst geübte Beobachter zwei Zungentöne von 500,0 bzw. 500,3 Schwingungen wie auch die Tonhöhen 1000,0 und 1000,5 stets als verschieden beurteilten, während eine Differenz von 0,2 nie sicher erkennbar war. Mit Hinzunahme der Bestimmungen von Delezenne und Seebeck ergab sich hieraus, daß innerhalb der drei Oktaven von c^0 bis c^3 die eben merkliche Differenz zweier Schwingungszahlen $n_1 - n = d$ und also auch die absolute Unterschieds-

[1]) Grenzen der Tonwahrnehmung, S. 26 ff. Jena 1876. (Daselbst auch die Zitate der älteren Arbeiten.) — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **18**, 373, 1898.

empfindlichkeit $\frac{1}{d}$ so gut wie konstant ist, die relative Unterschiedsempfindlichkeit $n : d$ aber nicht.

Die Verwendung von Stimmgabeln zur Ermittelung der Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit hat den Nachteil, daß es nicht leicht ist, Stärkeunterschiede der Klänge zu verhüten. Trotzdem erhielt Luft[1]) mit Gabeln auf Resonanzkasten Ergebnisse, die mit denen Preyers im wesentlichen übereinstimmen. Er fand als Unterschiedsschwelle für C 0,149; für c^0 0,159; für c^1 0,232; für c^2 0,251; für c^3 0,218 und für c^4 0,362. Daß seine Zahlen kleiner sind als die der früheren Autoren, hat wohl in dem relativ bequemen Versuchsmodus seinen Grund. Es wurde nämlich dem Urteilenden jedesmal vorher mitgeteilt, in welcher Richtung die Tonveränderung stattfinden würde, und er hatte nur anzugeben, bei welchem Versuche er einen Unterschied bemerkte. So ließ Luft, wie übrigens auch Preyer, seine Versuchspersonen nur über Gleichheit oder Ungleichheit der Tonhöhen entscheiden. Da diese Methode nicht ganz einwandfrei ist, so hat M. Meyer[2]) die Aufgabe schärfer dahin formuliert, daß nicht bloß die Existenz, sondern auch die Art des Unterschiedes von dem Beobachter festzustellen sei. Dabei erhielt er etwas größere, aber auch zuverlässigere Werte. Von der Hauptversuchsperson, C. Stumpf, wurde nachstehende Tabelle gewonnen, deren oberste Horizontalreihe die Tonhöhen der Versuchsgabeln angibt und die im übrigen in Prozentzahlen die richtigen Urteile über die Frage, welcher Ton der höhere war, enthält.

Verstimmung	100	200	400	600	1200
0,35	71	83	80	84	67
0,65	74	91	92	90	70

Sehr hohen und sehr tiefen Tönen gegenüber ist die Unterschiedsempfindlichkeit geringer und nimmt mit wachsender Annäherung an die Enden der Tonreihe immer mehr ab; namentlich gilt dies von der oberen Hörgrenze. An genaueren, zahlenmäßigen Feststellungen hierüber fehlt es indessen noch fast ganz. Erwähnenswert ist die Bemerkung Preyers, daß auch Geübte sich bei den Tönen unterhalb 40 Schwingungen um eine ganze Schwingung irren, und die Angabe Lufts, daß sich für ihn selbst bei Benutzung einer Gabel von 32 Schwingungen die Differenz 0,44 als Schwelle ergeben habe. Ungeübte, mögen sie auch musikalisch sein, pflegen in dieser tiefen Region Fehler von mehreren Schwingungen zu begehen, zumal wenn man Gabeln als Schallquellen wählt. Klaviertöne sind hinsichtlich der Höhenunterschiede der Intervalle leichter zu beurteilen, wahrscheinlich weil sie obertonreicher sind und ihre Klangfarbe uns vertrauter ist. Jedenfalls spielen Übung und Beobachtungsgabe immer eine wichtige Rolle, wo es sich um die Erkennung von minimalen Tonhöhendifferenzen handelt. Eine Unterschiedsempfindlichkeit von solcher Feinheit, daß eine Veränderung des Tones um

[1]) Wundts Philos. Stud. 4, 511 ff., 1888. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 16, 352 ff., 1898.

weniger als eine halbe Schwingung bemerkt wird, ist keineswegs jedem an und für sich eigen, sondern ein Optimum, das manche durch längere Beschäftigung mit Tönen zu erreichen vermögen, hinter dem aber die durchschnittliche Leistungsfähigkeit des menschlichen Ohres nicht unbeträchtlich zurückbleibt. Findet man doch, wie Stumpf[1]) mitteilt, nicht so selten Personen, die die Frage, welcher von zwei Tönen der höhere sei, selbst dann unrichtig beantworten, wenn das Intervall eine Terz, eine Quarte oder gar eine Quinte beträgt. Stumpf erhielt bei mehreren Versuchsreihen dieser Art im Mittel auf je vier Urteile nur drei zutreffende. Eine Dame erklärte sogar g^2 für höher als f^4.

c) Die Tonfarbe.

Wir pflegen uns die Tonempfindungen in Form einer Reihe zu vergegenwärtigen, die mit der tiefsten beginnt und mit der höchsten endet, während dazwischen die übrigen nach wachsender Schwingungszahl eingeordnet sind. Das stetige Zunehmen der Tonhöhe mit der Frequenz der Schwingungen ist wohl die wesentlichste Veranlassung hierzu, aber nicht die einzige. Es gibt noch andere Merkmale der Tonempfindungen, die sich zugleich mit der Höhe kontinuierlich verändern.

In dieser Beziehung sei zunächst der größeren oder geringeren Helligkeit gedacht, die wir den Toneindrücken zuschreiben. Die tieferen Töne haben einen dumpfen, dunkeln Charakter, die höheren erscheinen hell. Der Unterschied tritt besonders klar hervor, wenn man Töne der tiefsten Oktave mit solchen aus der höchsten Region vergleicht, weniger deutlich bei mittleren Tönen. Er beruht zum Teil auf naheliegenden Assoziationen; zum Teil ist er aber auch in der Qualität der Empfindungen selbst begründet, wie daraus hervorgeht, daß kleine Kinder, die weder die Ausdrücke „hoch“ und „tief“ kennen, noch sonst musikalische Anlagen besitzen, zuweilen von selbst auf die Bezeichnungen „dumpf“, „dunkel“ oder „hell“ zur Unterscheidung von Tönen verfallen[2]).

Neben seiner Dunkelheit oder Helligkeit ist dem empfundenen Tone eine gewisse Größe eigen. Die tiefen Töne haben etwas Massiges, Gewaltiges, Kopf und Körper des Hörers Umflutendes, während man den höchsten Prädikate wie „dünn“, „fadenförmig“, „spitzig“, „winzig“ beizulegen pflegt. Von den Griechen wurde dieses Verhältnis geradezu zur Klassifizierung der Töne benutzt, indem sie nicht wie wir von hohen und tiefen, sondern von scharfen (spitzen) und schweren Tönen sprachen. Die von jedem leicht zu machende Beobachtung, daß die tiefen Töne von umfangreichen Instrumenten ausgehen, deren Schwingungen oft nicht nur gehört, sondern auch als Erzitterungen gefühlt werden und lange nachhallen, daß die großen Tiere eine tiefe, die kleinen eine hohe Stimme haben, und ähnliche Erfahrungen tragen gewiß dazu bei, die Vorstellung einer Ausdehnung mit den Tönen zu verknüpfen. Aber abgesehen hiervon kommt, wie Stumpf in seiner Tonpsychologie überzeugend nachgewiesen hat, der Tonempfindung eine gewisse Größe als immanente Eigentümlichkeit zu, obgleich sich diese Größe mit dem Begriff einer räumlichen Eigenschaft im gewöhnlichen optischen oder haptischen Sinne nicht vollkommen deckt.

[1]) Tonpsychologie 1, § 14, 1883. — [2]) Stumpf, Tonpsychologie 2, 531.

Wenn wir die tiefen Töne als weich, die hohen als scharf bezeichnen, so hängt auch dies teilweise mit der Extensität der Töne zusammen. Alles Weiche hat eine gewisse Breite, während die „Schärfe" an die längliche, dünn geschliffene Messerklinge erinnert. Der ausschlaggebende Grund für die Wahl dieser Prädikate dürfte aber der sein, daß die höheren Töne eine relativ größere Empfindungsintensität besitzen als die tieferen. Diese Tatsache ist schon Descartes und Chladni aufgefallen. Später hat dann Helmholtz[1]) im Gegensatz zu der von anderen Akustikern ausgesprochenen Voraussetzung, die Stärke der Töne verschiedener Höhe sei unter übrigens gleichen Umständen der lebendigen Kraft der Luftbewegung direkt proportional, durch einen einfachen Versuch mit seiner Doppelsirene gezeigt, daß, wenn die gleiche mechanische Arbeit aufgewendet wird, um tiefe oder hohe Töne bei sonst identischen Bedingungen zu erzeugen, letztere die ersteren hinsichtlich ihrer subjektiven Stärke außerordentlich übertreffen. Die Zunahme der Tonstärke mit der Tonhöhe erwies sich besonders bedeutend in der tiefsten Region der Skala und ließ sich bis zum a^2 verfolgen. Da die lebendige Energie oder, was dasselbe bedeutet, die mechanische Arbeit proportional $(an)^2$ ist, wenn a die Amplitude und n die Schwingungszahl bezeichnet, so nimmt bei gleich bleibender Energie und wachsender Tonhöhe a in demselben Maße ab, wie n zunimmt. Die Helmholtzsche Beobachtung beweist also, daß von zwei verschiedenen Tönen, die die gleiche Amplitude haben, der höhere der lautere ist, und daß die Amplitude des höheren bis zu einem mit der Höhe variierenden Grade kleiner werden kann als die des anderen, ehe ersterer sein Übergewicht an Empfindungsstärke einbüßt. Die von Bosanquet[2]) experimentell begründete Theorie, daß zwei verschieden hohe Töne der mittleren Oktaven gleich laut erscheinen, wenn die Arbeit der Wellenlänge proportional ist, kommt auf dasselbe hinaus und desgleichen das Resultat einer Untersuchung von Charpentier[3]), der, wie vor ihm gelegentlich schon R. Koenig, konstatierte, daß Töne zwischen f^0 und f^3, denen man bei ihrer Erregung gleiche Schwingungsweiten gibt, in um so größerem Abstande hörbar sind, je höher die Schwingungszahl ist. Auch Max Wien hat Versuche über die Beziehungen zwischen Tonhöhe und Empfindlichkeit des Ohres angestellt, wozu er Telephone benutzte. Er fand[4]), daß die Telephonströme für die tiefen Töne verhältnismäßig stark sein müssen, damit ein eben noch merklicher Ton entsteht. Die Empfindlichkeit steigt dann rasch mit der Tonhöhe, erreicht in der Gegend von 1000 bis 5000 Schwingungen ein Maximum und nimmt weiter aufwärts wieder ab. Zwischen diesen Beobachtungen und gewissen Erfahrungen des täglichen Lebens, wie der, daß man Donner und Kanonenschüsse noch in sehr großen Entfernungen hört, daß tiefe Glockentöne weiter dringen als hohe, selbst wenn sie in der Nähe für gleich laut gehalten werden, oder daß Pauke bzw. Kontrabaß die ersten Instrumente sind, die bei der Annäherung an ein fernes Orchester vernehmbar werden, besteht zwar dem Anscheine nach ein Widerspruch, aber derselbe dürfte sich wohl bei genaueren Untersuchungen eben als ein nur scheinbarer herausstellen.

---

[1]) Lehre von den Tonempfindungen (5), 290. — [2]) Philos. Mag. (4), **44**, 381, 1872. — [3]) Arch. de Physiol. norm. et path. 1890, p. 496. — [4]) Pflügers Arch. **97** (1903).

Die großen Stimmgabeln für die tiefsten Töne müssen unmittelbar ans Ohr gehalten werden, sonst bleibt der akustische Effekt trotz der beträchtlichen, mehrere Millimeter betragenden Amplitude gleich Null, während bei den Gabeln für sehr hohe Töne ein verhältnismäßig schwacher Anstoß genügt, um einen im ganzen Zimmer hörbaren Ton hervorzurufen. Die Perzeption der sehr hohen Töne ist sogar, wenn die Gabeln stark gestrichen werden, geradezu schmerzhaft und mit mancherlei unangenehmen Nebenempfindungen verknüpft. Preyer[1]) hat einige interessante Beobachtungen hierüber mitgeteilt, deren Richtigkeit ich an verschiedenen Personen bestätigt gefunden habe. Es stellt sich bei vielen ein Gefühl ein, als würden die Trommelfelle nach innen gezogen oder mit einer feinen Nadel gestochen. Einige haben eine Empfindung, wie wenn ihnen ein dünner Faden durch den Kopf gezogen würde; auch treten zuweilen eigentümliche Sensationen in der Haut des Rückens auf. Den der Grenze nahen höchsten Tönen der Galtonpfeife ist wieder eine geringere Stärke eigen, ob aus physiologischen oder physikalischen Gründen, muß einstweilen dahingestellt bleiben. Sie erregen kaum Schmerz, aber häufig Unlustgefühle. Der musikalische Charakter geht ihnen völlig ab, man ist vielmehr eher geneigt, sie mit Geräuschen zu vergleichen. Bei zunehmender Verkürzung des Pfeifenrohres werden sie merklich leiser, winziger und spitzer, schließlich gleichsam punktförmig, während der Eindruck eines entsprechenden Höherwerdens fehlt. Die Veränderung des Intensiven und Extensiven in der Empfindung überwiegt hier also die des rein Qualitativen.

Die drei mit der Höhe stetig sich verändernden Merkmale der Tonempfindung, Helligkeit, Größe und Stärke, hat Stumpf in den Begriff Tonfarbe zusammengefaßt[2]). Die Tonfarbe ist für den einfachen Ton das, was wir beim Zusammenklingen eines Grundtones mit seinen Obertönen als Klangfarbe bezeichnen. Freilich existiert, wie schon hervorgehoben wurde, kein Instrument, das ganz reine Grundtöne gibt, aber die Fähigkeit unseres Ohres, Klänge in ihre Bestandteile, die Teiltöne, zu zerlegen, setzt uns in den Stand, jederzeit aus einem Tongemenge den einen oder anderen einfachen Ton zu isolieren und seine Farbe zu beurteilen. Übrigens treten in den Klängen der Stimmgabeln und gewisser Orgelpfeifen die Obertöne nach Zahl und Stärke so sehr in den Hintergrund, daß diese Klänge wenigstens für die musikalische Auffassung als einfache Töne gelten und zu Beobachtungen über die Tonfarbe benutzt werden können. Den Ton einer mäßig stark angeschlagenen Gabel aus der mittleren Region der Skala charakterisieren wir durch den Ausdruck „weich“ oder „milde“, wozu die Schwäche der Empfindung Veranlassung gibt. Handelt es sich um einen tiefen Ton, dessen Dunkelheit sich besonders dem Bewußtsein aufdrängt, so nennt man ihn „dumpf“. Die höchsten Töne der Galtonpfeife wird dagegen niemand als dumpf oder weich bezeichnen. Sie erscheinen „hell“ und namentlich, weil das extensive Moment der Empfindung hervortritt, „dünn“. Sind sehr hohe Töne zugleich kräftig, so erhalten sie Prädikate wie „gellend“, „schrill“, „stechend“, „durchdringend“, bei deren Wahl wohl das Auftreten der vorhin beschriebenen unangenehmen Nebenempfindungen mitspricht.

---

[1]) Grenzen d. Tonwahrnehmung S. 21 u. 22. — [2]) Tonpsychol. 2, § 28.

d) Intensitätsschwelle und Hörschärfeprüfung.

Eine Tonempfindung ist etwas durchaus Einheitliches, nicht weiter in Teile Zerlegbares. Wollen wir indessen zwei Tonempfindungen miteinander vergleichen, so kann es in doppelter Beziehung geschehen, nämlich sowohl hinsichtlich der Qualität (Höhe, Farbe) als auch hinsichtlich der Stärke. Anders ausgedrückt: wir können einen Ton so verändern, daß wir sagen, er habe eine andere Höhe bekommen, aber die Stärke sei dieselbe geblieben, oder so, daß wir sagen, er sei lauter oder leiser, jedoch weder höher noch tiefer geworden. In diesem Sinne ist es zu verstehen, wenn wir an einer Tonempfindung ihre Höhe und ihre Stärke unterscheiden.

Die Stärke der Empfindung eines Tones von bestimmter Schwingungszahl hängt in erster Linie von der Intensität ab, mit welcher der Schallreiz das Ohr trifft, ferner von dem Vorhandensein oder Fehlen anderer gleichzeitiger Gehörseindrücke, von der psychischen Disposition des Hörenden und den funktionellen Verhältnissen des Ohres. Unter der physikalischen Stärke eines Tones verstehen wir bei fortschreitenden Wellen dasjenige Quantum Arbeit, welches in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit geht. Es ist diese Größe $J = \frac{1}{2} \varrho_0 c (2\pi a n)^2$, wenn ϱ_0 die Dichtigkeit des leitenden Mediums, c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, a die Amplitude und n die Schwingungszahl bedeutet[1]). Der Physiologie des Hörens fällt die Aufgabe zu, unter normalen Bedingungen festzustellen, bei welchem Werte von J bzw. a der Ton von der Höhe n eben hörbar ist und in welcher Weise sich andererseits die Empfindungsstärke dieses Tones mit stetig wachsendem J ändert. Da die Empfindlichkeit des Ohres für verschieden hohe Töne verschieden ist, müssen beide Probleme für die einzelnen Tonhöhen gesondert gelöst werden.

Wenn die Art der Luftbewegung in einer tönenden Pfeife bekannt ist, so läßt sich auf Grund gewisser theoretischer Untersuchungen von Helmholtz auch die Schwingungsweite in demjenigen Abstande von der Schallquelle finden, in welchem das Ohr den Ton eben noch vernimmt. Toepler und Boltzmann[2]) haben eine solche Bestimmung ausgeführt, zu der sie eine gedackte Pfeife von 181 Schwingungen (*fis*^{0}) benutzten. Aus Beobachtungen der stroboskopisch verlangsamten Bewegung eines schwingenden Interferenzstreifens, der dadurch zustande kam, daß ein unterhalb der Decke durch die Pfeife geleiteter Lichtstrahl mit einem außen an der Pfeife vorbeigehenden vereinigt wurde, berechneten sie den Dichtigkeitswechsel der Luft im Knoten der Pfeife und konnten daraus das Schwingungsgesetz für jede beliebige andere Stelle ableiten. Die Pfeife war auf einem freien Platze für ein gutes Ohr unter Berücksichtigung des herrschenden Windes im Mittel 115 m weit hörbar. Die Amplitude betrug in dieser Entfernung 0,00004 mm oder 40 $\mu\mu$; das ist etwa $^1/_{10}$ der Wellenlänge des grünen Lichtes. Da jedoch das Tagesgeräusch der nahen Stadt nicht ganz ausgeschlossen werden konnte, so meinten die Autoren, daß ein feines Ohr zur Nachtzeit gewiß noch viel kleinere Amplituden wahrnehmen würde. In der Tat erhielt Rayleigh[3]), mit einer Pfeife von

---

[1]) Rayleigh, Theorie des Schalles, Braunschweig 1880, § 245. — [2]) Pogg. Ann. 1870, S. 321 ff. — [3]) Proc. Roy. Soc. **26**, 248, 1878.

der Tonhöhe f^4 experimentierend, aus der der Schallquelle zugeführten Energie und der Distanz, in welcher der Ton eben noch ohne Anstrengung zu hören war, als Schwellenamplitude nur $8{,}1 \cdot 10^{-8}$ cm $= 0{,}81\ \mu\mu$. Später[1]) hat er derartige Untersuchungen auch noch mit Stimmgabeln angestellt, wobei das Prinzip des Verfahrens das folgende war. Zunächst wurde die Amplitude der Gabel mikroskopisch beobachtet und, wenn sie bis auf eine gewisse Größe gesunken war, dem in einem bestimmten Abstande befindlichen Mitarbeiter ein Zeichen gegeben, worauf derselbe nach der Uhr die Zeit feststellte, während welcher er den allmählich verklingenden Ton noch hören konnte. Aus dieser Zeitangabe wurde dann theoretisch die Amplitude ermittelt, welche die Gabel in dem Momente, wo der Ton unhörbar ward, besaß, und hieraus wieder die Amplitude, mit der der Ton im Augenblicke des Verschwindens am Trommelfell des Hörers anlangte. Auf diese Weise bekam Rayleigh für die Note c^1 $1{,}27 \cdot 10^{-7}$ cm $= 1{,}27\ \mu\mu$; für g^1 ergibt die Berechnung seiner Daten $0{,}65 \cdot 10^{-7}$ cm $= 0{,}65\ \mu\mu$, für c^2 $0{,}49 \cdot 10^{-7}$ cm $= 0{,}49\ \mu\mu$. Auch Rayleigh betont jedoch, daß alle seine Werte infolge der Vernachlässigung der Energieverluste noch zu groß seien. Den eben erwähnten ganz ähnliche Versuche machte C. K. Wead[2]) mit sechs Stimmgabeln, deren Tonhöhen c^0, c^1, g^1, c^2, g^2 und c^3 waren. Die Ergebnisse wichen, von c^0 und g^2 abgesehen, relativ wenig voneinander ab. Die kleinste Schwellenamplitude, nämlich $7 \cdot 10^{-8}$ cm (nicht $70 \cdot 10^{-8}$ cm, wie a. a. O. irrtümlich angeben ist) oder $0{,}7\ \mu\mu$, erhielt Wead für den Ton c^2.

Diese Resultate — diejenigen anderer Autoren, wie Allard, Stefanini, Zwaardemaker und Quix, können hier ganz übergangen werden — sind insofern nicht völlig einwandfrei, als sie zum Teil auf Annahmen beruhen, deren Berechtigung nicht über jeden Zweifel erhaben ist. Eine Methode, die Minimalamplitude unmittelbar am Ohre zu messen, anstatt sie zu berechnen, wäre daher prinzipiell vorzuziehen. Eine Untersuchung in dieser Richtung hat Max Wien[3]) unternommen. Wird auf die sonst zur Einführung in das Ohr bestimmte Öffnung eines Helmholtzschen Resonators nach passender Erweiterung eine dünne, elastische Metallplatte aufgelötet, deren Eigenton mit dem des Resonators übereinstimmt, so gerät sie bei Erregung des letzteren in relativ beträchtliche Schwingungen. Man kann dieselben meßbar machen, indem man sie in geeigneter Weise von der Platte auf einen Spiegel übertragen läßt. Das Bild eines Spaltes, das der Spiegel in ein Fernrohr wirft, erscheint, durch dieses betrachtet, sobald das System schwingt, nicht als Lichtlinie, sondern als helles Band, und die Breite des Bandes ist der Druckdifferenz bzw. der Amplitude des Tones proportional. Wien konstruierte drei solche „empfindliche" Resonatoren, entsprechend den Tönen a, e^1, a^1. Aus der an dem Lichtbande gemessenen Druckdifferenz im Resonator ließ sich diejenige außen an der Öffnung desselben rechnerisch und experimentell ermitteln, und dann durch Reduktion der Ausschläge des empfindlichen Resonators auf die eines „absoluten" direkt in Quecksilberdruck angeben. So fand Wien, daß für a^1 die größte Druckänderung in jenem Abstande von der

---

[1]) Philos. Mag. (5) **38**, 365 ff., 1894. — [2]) Amer. Journ. of Science (3) **26**, 177 ff., 1883. — [3]) Über die Messung der Tonstärke, Berliner Dissert. 1888 und Wiedemanns Ann. **36**, 834, 1889.

Schallquelle (einem Telephon), in welchem sein Ohr den Ton eben noch wahrnahm, 0,59 $\mu\mu$ Quecksilber betrug und somit die Schwellenamplitude gleich 0,066 $\mu\mu$ war. Vor kurzem [1]) hat er noch weitere Beobachtungen mitgeteilt, die mittels intermittierender Telephontöne gewonnen wurden und unter anderem folgende Tabelle ergaben, in welcher N die Schwingungszahl und J, in Erg ausgedrückt, die zugehörige Schwellenintensität am Ohre bedeutet.

N	J	N	J	N	J
50	$3{,}2 \cdot 10^{-4}$	400	$1{,}6 \cdot 10^{-10}$	3200	$2{,}5 \cdot 10^{-12}$
100	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$	800	$8{,}0 \cdot 10^{-12}$	6400	$8{,}0 \cdot 10^{-12}$
200	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$	1600	$2{,}5 \cdot 10^{-12}$	12800	$9{,}0 \cdot 10^{-11}$

Die hier mitgeteilten Schwellenwerte geben uns ungefähr ein Bild von der durchschnittlichen Empfindlichkeit gut hörender Ohren. Die normale Hörschärfe zeigt gewisse individuelle Schwankungen, was leicht verständlich wird, wenn man bedenkt, daß nicht alle gleich befähigt sind, äußerst schwache Sinneseindrücke zu bemerken, und daß schon kleine Unterschiede in der Struktur oder dem Zusammenhang der einzelnen Teile des Gehörorganes Differenzen in der Wahrnehmung bedingen können. Gibt es doch genug Personen, die mit dem einen Ohr schärfer hören als mit dem anderen, ohne daß sich hierfür ein besonderer Grund, etwa eine frühere Erkrankung oder eine störende Ansammlung von Cerumen, nachweisen ließe; gleichwie ja auch die meisten Menschen eine Verschiedenheit der Tonhöhe wahrnehmen, wenn der nämliche objektive Ton erst dem einen und dann dem anderen Ohre dargeboten wird.

Die Ohrenärzte haben zuweilen Gelegenheit, eine Steigerung der Hörschärfe über die Norm zu konstatieren. So hören Patienten mit Facialislähmung, wenn der den Steigbügelmuskel versorgende Zweig mit ergriffen ist, tiefe Töne auf eine größere Distanz als Gesunde. Auch bei Erkrankungen des Labyrinthes, des *Nervus acusticus* und des Zentralorganes, z. B. nach Sonnenstich oder im Verlaufe meningitischer Reizzustände, kommt es vor, daß Töne und Geräusche außerordentlich verstärkt vernommen werden. In der Regel sind dabei die Schallempfindungen zugleich unangenehm, peinigend oder direkt schmerzhaft. Beide Symptome, die Steigerung der Hörschärfe und die Schmerzempfindlichkeit, werden in der otiatrischen Literatur meistens in den Begriff der Hyperästhesie zusammengefaßt. Vom physiologischen Standpunkte aus dürfte es sich aber empfehlen, die erstere als Hyperacusis von der letzteren als eigentlicher *Hyperaesthesia acustica* zu unterscheiden. Die Hyperakusie kann ihren Grund entweder in der Insuffizienz der normalen Dämpfungsvorrichtungen im Ohre haben oder in einer pathologisch erhöhten Erregbarkeit der schallleitenden Nervenbahnen. Die Hyperästhesie ihrerseits ist keineswegs an eine Steigerung der Hörschärfe gebunden. Sie ist vielmehr wiederholt bei Schwerhörigkeit und totaler Taubheit beobachtet worden, wodurch die Auffassung nahe gelegt wird, daß sie — wenigstens in Fällen dieser Art — auf einer Reizung von Tast- oder Schmerznervenendigungen beruht.

[1]) Pflügers Arch. 97, 1 ff., 1903.

Ganz außerordentlich viel häufiger als die Hyperakusie sind die verschiedenen Formen und Grade der Hypakusie, der Herabsetzung der Hörschärfe. Ihre Ursachen sind teils angeboren, teils erworben und bestehen in Funktionsanomalien des Mittelohres, des inneren Ohres oder des Nervensystems Wie mannigfache otiatrische Erfahrungen lehren, kann die Schwächung des Gehörs für Töne und für Geräusche ungleich sein. Bald sind erstere, bald letztere mehr benachteiligt. Mangelhaftes Hören des Uhrtickens kommt neben normaler Wahrnehmung der Flüstersprache und vermindertes Sprachgehör neben intakter Perzeption einzelner Töne vor. In vielen Fällen beschränkt sich die Schwerhörigkeit bzw. Taubheit für Töne auf einen bestimmten Abschnitt der Tonskala und dann in der Regel auf das obere oder untere Ende derselben. Es wird jedoch auch der Ausfall des einen oder anderen Teiles der mittleren Region beobachtet; namentlich bei Taubstummen sind in neuerer Zeit derartige Tonlücken und von Tonlücken begrenzte Toninseln gefunden worden, seit Bezold das ohrenärztliche Instrumentarium durch die Kontinuierliche Tonreihe, die mittels einiger Laufgewichtgabeln und Pfeifen die Erzeugung aller Töne vom tiefsten bis zum Bereich der Galtonpfeife ermöglicht, vervollkommnet und auf die Wichtigkeit der genauen Untersuchung des Hörvermögens der Taubstummen aufmerksam gemacht hat. Im ganzen zeigen also die pathologischen Beobachtungen gleichwie die Fähigkeit unseres Gehörs, Klänge in ihre Teiltöne zu zerlegen, und andere physiologische Tatsachen, daß den einzelnen Tonempfindungen eine gewisse Unabhängigkeit voneinander zukommt, und eben diese Selbständigkeit, die ja auch in der Helmholtzschen Theorie des Hörens ihre anatomische Begründung findet, macht es dem Ohrenarzt zur Aufgabe, seine Hörprüfung auf um so mehr Töne auszudehnen, je größere Ansprüche er an ihre Exaktheit stellt.

Da die Vokale kompliziert zusammengesetzte Klänge sind und auch die Konsonanten gleich anderen Geräuschen, wenn nicht ausschließlich, so doch wenigstens zum größten Teil aus verschiedenen Tönen bestehen, kann die Feststellung der Hörschärfe mittels der Sprache, der Taschenuhr, des Politzerschen Hörmessers oder aus variabler Höhe fallender Kugeln keine Resultate von streng wissenschaftlicher Brauchbarkeit liefern. Falls es auf Genauigkeit ankommt, muß man vielmehr Schallquellen wählen, die möglichst einfache Töne geben, wie die Stimmgabeln oder die weit mensurierten gedackten hölzernen Orgelpfeifen, welche letztere vor den Gabeln den Vorzug der größeren Tonstärke haben, so daß sie gelegentlich noch hörbar sind, wo für jene bereits Taubheit eingetreten ist.

Die Hörschärfe des Ohres für einen (einfachen) Ton ist umgekehrt proportional derjenigen physikalischen Intensität desselben zu setzen, bei welcher eben noch eine Wahrnehmung möglich ist. Bezeichnen wir mit H_n die normale, mit H_p die zu prüfende über- oder unternormale Hörschärfe und mit I_n bezw. I_p die zugehörigen Schwellenintensitäten, so ist $H_p : H_n = \frac{1}{I_p} : \frac{1}{I_n}$ oder $H_p = \frac{I_n}{I_p} \cdot H_n$. Für die Messung der Hörschärfe ist also die Kenntnis der absoluten Werte von I_n und I_p an sich nicht nötig, es genügt die des Verhältnisses $I_n : I_p$. Das Bestreben, eine präzise und zugleich bequeme Methode zur Bestimmung dieses Bruches zu finden, hat eine große Zahl zum Teil an Unklarheiten und Mißgriffen in bezug auf die physikalischen Vor-

fragen reicher otiatrischer Abhandlungen gezeitigt. Eine ins einzelne gehende historisch-kritische Würdigung derselben liegt nicht im Plane meiner Darstellung. Dagegen sollen im folgenden die hier in Betracht kommenden Prinzipien erörtert werden; allerdings nur mit Beziehung auf solche Töne, die durch Luftleitung zum Ohre gelangen.

Zunächst kann man daran denken, die Abnahme der Tonstärke mit der Entfernung zur Feststellung der Hörschärfe zu benutzen. Nehmen wir an, wir hätten es mit einer punktförmigen, überall von gleichartiger Luft umgebenen Tonquelle zu tun, so wird deren Energie E sich nach allen Richtungen des Raumes gleichmäßig fortpflanzen und daher in sämtlichen Punkten einer die Tonquelle als Mittelpunkt umgebenden Kugeloberfläche vom Radius r gleiche Intensität herrschen, so daß im Abstande r von dem Tonzentrum auf den Quadratmillimeter — das ist etwa der dreißigste Teil vom Querschnitte des Gehörganges — die Intensität $I = \frac{E}{4\,\pi\,r^2}$ entfällt. Hört also das normale Ohr den Ton eben noch in der Entfernung r_n, das zu prüfende in der Entfernung r_p, so verhalten sich die Schwellenintensitäten $I_n : I_p = r_p{}^2 : r_n{}^2$. Durch den Bruch $\left(\frac{r_p}{r_n}\right)^2$ wäre mithin die Hörschärfe bestimmt. Es ist aber der Einwand erhoben worden, daß der Schall gar nicht mit dem Quadrat des Abstandes, sondern im linearen Verhältnis zu demselben abnehme, ein Einwand, der sich namentlich auf gewisse Versuche von Vierordt[1]) stützt. Derselbe ließ Kugeln von verschiedener Schwere aus wechselnder Höhe auf Platten fallen und fand als Maß der Intensität des so erzeugten Schalles die Größe $p \cdot h^\varepsilon$, wobei p das Gewicht, h die Fallhöhe und ε ungefähr gleich 0,6 ist. Mit Hilfe dieses Schallmaßes kam er dann zu dem Resultat, daß die Schallstärke sich proportional der Distanz verringere. Ich selbst[2]) habe nach einer besonders zu diesem Zweck erdachten psychophysischen Methode Versuche mit Telephongeräuschen angestellt, bei denen die Abnahme der Intensität zwar in der Nähe der Schallquelle langsamer stattfand als mit dem Quadrat der Entfernung, mit wachsendem Abstande aber immer rascher vor sich ging. Der Gegenstand bedarf, wie man sieht, noch der weiteren Klärung. Was dieselbe aber auch ergeben möge, jedenfalls wird es kaum berechtigt sein, aus Beobachtungen, welche die physikalisch schwer definierbaren und teilweise von Versuch zu Versuch in ihrer Qualität schwankenden Geräusche betreffen, ohne weiteres Schlüsse auf das Verhalten von Tönen zu ziehen. Wie die Stärke eines einfachen Tones mit der Entfernung abnimmt, muß eben an Tönen studiert werden. Eine Untersuchung dieser Art verdanken wir Max Wien[3]). Sie wurde mit einer kräftigen gedackten Pfeife als Tonquelle in der Charlottenburger Rennbahn unternommen, und zwar nach der früher besprochenen Wienschen Methode der direkten Amplitudenmessung. Das Resultat war die sichere Bestätigung des Gesetzes von der Abnahme der Intensität mit dem Quadrat der Entfernung; denn obwohl die Verminderung in Wirklichkeit eine etwas schnellere war, als die Theorie es verlangt, so ließ sich dies doch vollkommen aus der Unruhe der Luft und

[1]) Die Schall- und Tonstärke und das Schallleitungsvermögen der Körper, Tübingen 1885. — [2]) Wiedemanns Ann. **57**, 785, 1896. — [3]) Ebenda, **36**, 853 ff., 1889.

der Reibung am Boden erklären. Auch Hesehus[1]), der die Distanz ermittelte, in welcher mehrere (4, 9, 16) gleichartige und gleichzeitig klingende Glocken ebenso laut gehört werden wie eine einzige in bestimmtem Abstande vom Ohre befindliche, überzeugte sich, daß die Schallstärke umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung ist, wenn letztere mehr als 10 Schritt beträgt. Indessen darf nicht übersehen werden, daß diese Versuche mit größeren Distanzen und im Freien ausgeführt sind. In geschlossenen, selbst größeren Räumen bilden sich infolge der Reflexion an den Wänden und Gegenständen stehende Wellen mit Maximis und Minimis der Intensität, also ganz komplizierte Beziehungen zwischen der Hörstärke des Tones und dem Abstand der Schallquelle vom Ohre, die sich nicht von vornherein in eine einfache Regel fassen lassen. Physiologen und Ohrenärzte sind aber meist auf Beobachtungen im Zimmer angewiesen. Dazu kommt ferner, daß unsere Tonmittel nicht als punktförmige Zentra anzusehen sind und daher den Schall nicht nach allen Richtungen mit gleicher Stärke in die Umgebung entsenden. Ganz besonders gilt dies von den Stimmgabeln, die gerade am häufigsten zur Hörschärfeprüfung Verwendung finden. Somit gelangen wir zu dem Schluß, daß die Hörweite, vor der Hand wenigstens, als Maß für die Feinheit des Gehörs nicht zu gebrauchen ist.

Der verklingende Ton einer Stimmgabel entschwindet dem Ohre um so eher, je schlechter es hört. Es ist das Verdienst v. Contas[2]), diese Tatsache zuerst zur Bestimmung der Perzeptionsfähigkeit des Ohres benutzt zu haben. Seitdem ist die Feststellung der Hördauer ein wichtiges Hilfsmittel der otiatrischen Diagnostik geworden. Sie kann indessen nur dann ein richtiges Bild der wirklichen Hörschärfe geben, wenn sich aus ihr die Intensität I_p berechnen läßt, mit welcher der Ton im Augenblick des Erlöschens das zu prüfende Ohr trifft, oder wenigstens das Verhältnis von I_p zur normalen Schwellenintensität I_n. Zu diesem Zwecke muß man wissen, in welcher Weise die physikalische Intensität mit wachsender Klangdauer der Gabel abnimmt. Wead[3]) hat für die Energie V einer tönenden Gabel die Formel $V = \frac{b\,d^3\,E}{8\,l^3}\,a^2$ abgeleitet, worin l die Länge, d die Dicke, b die Breite der Zinken, a die Amplitude und E der Youngsche Modulus für Stahl ist. Die Verminderung der Energie beim Verklingen hängt hiernach nur von der zunehmenden Verkleinerung der Amplitude ab. Letztere verläuft aber theoretisch nach einer bestimmten Gesetzmäßigkeit, nämlich so, daß die Amplitude, wenn sie in irgend einem gegebenen Moment die Größe a_0 hat, t Sekunden später auf $a_0 \cdot \frac{1}{e^{ht}}$ gesunken ist, wobei $e = 2{,}718$ die Basis der natürlichen Logarithmen und h die für jede Gabel besonders zu bestimmende Dämpfung bedeutet. Stellen wir also eine Reihe zu äquidistanten aufeinanderfolgenden Zeitpunkten gehöriger Amplitudenwerte einer Gabel zusammen, so erhalten wir

Zeiten	t	$2\,t$	$3\,t$	$4\,t$ . . .
Amplituden	$a_0 \cdot \frac{1}{e^{th}}$	$a_0 \cdot \frac{1}{e^{2th}}$	$a_0 \cdot \frac{1}{e^{3th}}$	$a_0 \cdot \frac{1}{e^{4th}}$ . . .

[1]) Journ. d. russisch. physikal. chem. Gesellsch. (7), **18**, 268, 1886; Beiblätter z. Wiedemanns Ann. 1887, S. 512. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 107, 1864. — [3]) Amer. Journ. of Science (3), **26**, 177.

Die obere Reihe ist eine arithmetische, weil die Differenz, und die untere eine geometrische, weil der Quotient je zweier benachbarter Glieder konstant ist. In der Amplitudenreihe bilden die Exponenten untereinander wieder eine arithmetische Progression: das logarithmische Dekrement bleibt gleich. Die Richtigkeit dieses Satzes ist wiederholt experimentell nachgeprüft worden. Hensen[1]) gibt an, gestützt auf „genaue Messungen an drei Stimmgabeln von 256 v. d., daß das logarithmische Dekrement hier keine Konstante ist, sondern bis zu einer Elongation von 0,07 mm an und bei einer schweren Stimmgabel von 0,8 mm an abnimmt (Log. des Dekrements: 0,000028 bzw. 0,000285), um dann wieder recht merklich, und zwar mindestens auf Log. des Dekrements: 0,000047 bzw. 0,00069, zu wachsen". Jacobson[2]) fand, wenn er eine c-Gabel mittels einer Schreibspitze ihre Abschwingungskurve auf einen mit berußtem Papier überzogenen rotierenden Zylinder aufschreiben ließ, daß das logarithmische Dekrement wegen der Reibung beim Ausklingen allmählich immer größer wurde, gelangte aber nach möglichster Beseitigung der Reibung zu Resultaten, die bei genügend kleinen Amplituden mit der Theorie hinreichend übereinstimmten und deren Richtigkeit nachträglich von Thiry und Koch[3]) für eine C-, eine c^0- und eine c^1-Gabel bestätigt wurde, während eine c^2-Gabel wegen der Kleinheit der Schwingungsweiten und der Raschheit des Abschwingens zu derartigen Versuchen bereits unbrauchbar war. Barth[4]) hat ungefähr zu derselben Zeit wie Jacobson die Abschwingungskurve einer Gabel untersucht, indem er die schwingende Bewegung eines hell beleuchteten, an die eine Zinke gekitteten Quecksilberkügelchens mikrophotographisch fixierte. Mit Berücksichtigung der mancherlei Mängel seines Verfahrens kam er zu der Überzeugung, „daß das Dekrement abklingender Stimmgabeln unter konstanten Bedingungen konstant ist". Bezold und Edelmann[5]) konstruierten einen besonderen Apparat zur graphischen Registrierung von Stimmgabelschwingungen und prüften damit die Art des Abschwingens sehr tiefer Gabeln von D_1 bis Fis_1. Da sie jedoch nur eine aus den einzelnen Aufzeichnungen nach willkürlichen Gesichtspunkten kombinierte Kurve veröffentlicht haben, so lassen sich aus ihren Angaben keine physikalisch präzisen Schlüsse ziehen. Vor kurzem hat Jacobson in Gemeinschaft mit Cowl[6]) ein photographisches Verfahren zur Messung von Stimmgabelamplituden ausgearbeitet, während einer bald danach erschienenen Studie von Ostmann[7]) wiederum die mikroskopische Beobachtungsmethode zu Grunde liegt. Letzterer Autor experimentierte in der Weise, daß er die Elongationen eines an der Zinke klebenden, Licht reflektierenden Mehlstaubkörnchens während des Ausklingens mikroskopisch verfolgte und von Zeit zu Zeit die gefundenen Werte einem Assistenten zurief, der dann die zugehörigen Zeitpunkte am Chronometer ablas. Die Untersuchung erstreckte sich auf die Gabeln C, G, c, g, c^1, g^1, c^2, c^3 und c^4. Eine kontrollierende Durchmusterung der Kurventafeln ergibt mir eine im

---

[1]) Physiol. d. Gehörs; Hermanns Handb. d. Physiol. 3 (2), 120, 1880. — [2]) Verh. d. Physiol. Gesellsch. z. Berlin, 1886/87, Nr. 16 u. 17; Du Bois-Reymonds Arch. f. Physiol., 1887, S. 476. — [3]) Zeitschr. f. Ohrenheilkunde 20, 72, 1889. — [4]) Zeitschrift f. Ohrenheilk. 18, 30, 1887. — [5]) Ebenda 33, 174, 1898. — [6]) Engelmanns Arch. f. Physiol., 1903, S. 1 ff. — [7]) Ein objektives Hörmaß und seine Anwendung. Wiesbaden, Bergmann, 1903.

Verhältnis zu den Fehlerquellen, die in der Natur der Methode liegen, ganz gute Übereinstimmung mit den Befunden von Jacobson und Thiry, dahingehend, daß das Abschwingen im Anfang bei den größeren Amplituden zu rasch und erst später mit merklicher Konstanz geometrisch erfolgt, wie dies übrigens in ähnlicher Weise auch Braun[1]) für gespannte und nicht gespannte Stäbe gefunden hat.

Hiernach wird man, sofern es nicht gerade auf die ersten Momente nach dem Anschlagen ankommt, die Gleichung $a_t = a_0 e^{-ht}$ als hinreichend gültig zur praktischen Hörschärfeprüfung mittels der Stimmgabel benutzen dürfen. Man stelle zunächst die Zeit t_p fest, während welcher das schwerhörige Ohr die Gabel vernimmt, und bringe dann das normale Ohr genau an dieselbe Stelle des Raumes und in dieselbe relative Lage zur Gabel, an der inzwischen nichts verändert wird, um auch für dieses den Zeitpunkt t_n, in welchem der Ton eben unhörbar wird, zu bestimmen. Schreiben wir jetzt die oben angeführte Weadsche Gleichung in der einfachen Form $V = F.a^2$, so ist V zur Zeit t_p gleich $F.(a_0 e^{-ht_p})^2$. Von dieser Energiemenge gelangt jedoch nur ein Bruchteil, sagen wir $\frac{F(a_0 e^{-ht_p})^2}{N}$, an das Trommelfell des Hörenden. Die Schwellenintensität für das schwerhörige Ohr ist also $I_p = \frac{F}{N} \cdot (a_0 e^{-ht_p})^2$. Analog ergibt sich für die normale Schwellenintensität I_n der Wert $\frac{F}{N_1} \cdot (a_0 e^{-ht_n})^2$. Wenn nun beide Ohren unter genau den nämlichen äußeren Bedingungen beobachten, wie hier vorausgesetzt ist, so werden N und N_1 als gleich anzusehen sein, und wir erhalten die Proportion $I_n : I_p = (a_0 e^{-ht_n})^2 : (a_0 e^{-ht_p})^2$. Der Bruch $\left(\frac{a_0 e^{-ht_n}}{a_0 e^{-ht_p}}\right)^2$ ist aber gleich $\frac{e^{-2ht_n}}{e^{-2ht_p}} = e^{-2h(t_n - t_p)}$ und mithin die gesuchte Hörschärfe $H_p = e^{-2h(t_n - t_p)} \cdot H_n$. Diese schon von Jacobson[2]) erörterte Methode erfordert allerdings, daß die Dämpfung h für jede einzelne Stimmgabel ermittelt und von Versuch zu Versuch sorgfältig konstant erhalten wird. Dafür liefert sie indessen auch brauchbare Resultate, während z. B. das von A. Hartmann[3]) trotz mehrfacher Zurückweisungen noch immer empfohlene Verfahren, einfach $H_p = \frac{t_p}{t_n} \cdot H_n$ zu setzen, auf Wissenschaftlichkeit keinen Anspruch erheben kann, wie aus dem Vorstehenden ohne weiteres hervorgeht. Gegen die Benutzung der Hördauer als Maß der Hörschärfe wird zuweilen eingewendet, daß es sehr schwierig für das gesunde Ohr sei, den Moment, wo der Ton gerade verschwindet, präzise anzugeben. Allein etwaige Schwankungen, die mehrere Sekunden betragen können, verlieren hier deswegen an Gewicht, weil in der Nähe der normalen Schwelle die Amplituden sehr langsam abnehmen, was eben auch der Grund für das subjektiv unscharfe Verklingen ist. Ein Schwerhöriger kann das Minimum perceptibile sicherer fixieren, weil es bei ihm in den steileren Anfangsteil der Abschwingungskurve fällt.

Manche Ohrenärzte, wie Panse, Bezold und Ostmann, streben danach.

---

[1]) Pogg. Ann. **47**, 64, 1872. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **25**, 40 ff., 1887. — [3]) Die Krankheiten des Ohres und deren Behandlung. Berlin 1902.

direkt die Amplitude a_p zu finden, mit welcher die Gabel zur Zeit t_p schwingt. Selbstverständlich darf man a_p nicht unmittelbar als Maß der Hörschärfe betrachten, denn dieses ist und bleibt I_p, die Schwellenintensität des Tones am Trommelfell. I_p hängt aber von verschiedenen Umständen ab: erstens, da es sich um Töne handelt, nach fundamentalen Prinzipien der Physik von dem Quadrat der Amplitude, nicht von deren erster Potenz; zweitens, wie die Weadsche Formel lehrt, von der speziellen Beschaffenheit der benutzten Gabel; drittens von dem Verlust, den die Energie der Gabel erleidet, ehe sie als Schall das Ohr trifft. Dieser Verlust ist dadurch bedingt, daß ein Teil der Energie durch innere Reibung in Wärme verwandelt, ein anderer Teil durch den Stiel an die Umgebung abgegeben wird, wobei — was besonders betont zu werden verdient — die Art der Einklemmung von wesentlichem Einfluß ist. Wieviel akustische Energie aber in einem gegebenen Falle übrig bleibt, läßt sich schwerlich feststellen und ebensowenig, wieviel davon gerade an das Trommelfell gelangt, da die Verteilung der Tonintensität in geschlossenen Räumen und in der Nähe reflektierender Gegenstände so gut wie unkontrollierbar ist. Somit kann man aus a_p allein nicht einmal einen Schluß auf den Wert von I_p ziehen, da eben I_p gleich $\frac{b d^3 E}{8 l^3} \cdot a_p^2$, dividiert durch die unbekannte Größe N, ist. Anders verhält es sich dagegen, wenn außer a_p auch zugleich a_n, die Schwellenamplitude des normalen Ohres, mit derselben Gabel in demselben Raum und überhaupt unter absolut gleichen Bedingungen bestimmt wird. Dann ist $I_n = \frac{b d^3 E a_n^2}{8 l^3 N}$ zu setzen und damit $H_p = \left(\frac{a_n}{a_p}\right)^2 H_n$ gegeben. Eine hierauf basierende Hörschärfeprüfung würde etwa in folgender Weise vorzunehmen sein. Zuerst wird die Abschwingungskurve der zu verwendenden Gabel konstruiert, wobei die auf den Anschlag folgenden Zeiten die Abszisse, die zugehörigen Amplitüden die Ordinaten bilden. Dann wird der Ton der Gabel, die mit derselben Anfangsamplitude wie vorher in Schwingungen versetzt ist und an deren Montierung wegen des Einflusses der Einklemmung auf die Dämpfung nichts geändert sein darf, von dem zu prüfenden und dem normalen Ohre beobachtet und nach der Uhr die Zeit t_p bzw. t_n gemessen, worauf sich die diesen Zeitpunkten entsprechenden Amplituden a_p und a_n unmittelbar aus der Kurve oder einer Tabelle entnehmen lassen. Die Herstellung einer exakten Abschwingungskurve ist jedoch nichts weniger als einfach. Besser ist es schon, während des Versuches die Amplituden der Gabel direkt an ihr abzulesen, wofür Gradenigo[1]) ein besonderes Verfahren empfohlen hat. Nach reiflicher Überlegung aller in Betracht kommenden Punkte wird man indessen sagen müssen, daß die Stimmgabel überhaupt kein ideales Instrument für die Hörschärfebestimmung ist. Es ist darum auch wiederholt in Vorschlag gebracht worden, elektrische Apparate zu benutzen[2]).

[1]) Siehe Arch. f. Ohrenheilk. 50, 285, 1900 und Struycken, Zeitschr. f. Ohrenheilk. 46, 378, 1904. — [2]) Z. B. durch Hartmann, Du Bois-Reymonds Arch. f. Physiol. 1878, S. 155; Wodtke, Über Hörprüfung usw., Dissertation, Rostock 1878; Hughes, Nature, 1879, p. 77 u. 102; W. Preyer, Jenaische Gesellsch. f. Med. u. Naturw. Sitzung v. 21. Februar 1879; Jacobson, Du Bois-Reymonds Arch. 1888,

Dieselben beruhen fast alle auf dem Prinzip, daß durch Stromschwankungen die Platte eines Telephons zum Tönen gebracht und die Tonintensität durch Schwächung der Stromstärke bis zur Schwelle erniedrigt wird. Die älteren Autoren suchten dieses Ziel entweder auf dem Wege zu erreichen, daß in den Stromkreis eines möglichst konstanten Elementes eine elektromagnetische Unterbrechungsgabel oder ein Neefscher Hammer als Erreger des Telephons eingeschaltet und die Stromstärke durch einen Rheostaten reguliert wurde, oder sie ließen den Strom des Elementes außer durch den Unterbrecher durch eine primäre Rolle gehen, mit deren sekundärer das Telephon verbunden war, und die Abschwächung des Telephontones geschah mittels Entfernung der Rollen voneinander. Beide Anordnungen haben den Übelstand, daß die Tonhöhe sich nur schwierig oder wenig variieren läßt und daß die Telephonplatte keine einfachen Töne gibt. Das Audiometer oder Sonometer von Hughes, bei dem übrigens die Telephonrolle auf einem Schlitten zwischen zwei entgegengesetzt induzierenden Spulen angebracht ist, enthält im primären Stromkreis ein Mikrophon. Von diesem könnte man den Ton einer mit verschieblichem Stempel versehenen und daher in der Tonhöhe variablen Pfeife aufnehmen lassen; aber dann müßte wieder für die präzise Konstanz des Mikrophons und des Pfeifentones gesorgt werden. Jacobson hat in der angeführten Untersuchung sein Augenmerk besonders darauf gerichtet, die Unreinheit der Plattentöne zu beseitigen, und sich zur Telephonerregung einer immer gleich stark angeschlagenen und dann ausschwingenden Gabel bedient. Indessen ist hierbei wieder für einen genügenden Wechsel der Tonhöhe ein sehr umfangreiches Gabelmaterial nötig. Von einem wirklich tadellosen Hörschärfemesser wird man verlangen müssen, daß er leicht Töne von jeder gewünschten Höhe liefert, daß die Töne rein sind, daß ihre Intensität exakt meßbar ist und daß sie dem Ohre zur bequemen Beobachtung beliebig lange in gleichmäßiger Stärke dargeboten werden können. Am besten scheint mir allen diesen Anforderungen das von Wien angegebene Instrumentarium zu entsprechen. Auch dieser Autor benutzte als Tonquelle ein Telephon, das fest an das Ohr gedrückt wurde oder mit einem Deckel nebst Ansatzrohr zum Einführen in den Gehörgang versehen war, wobei freilich zugleich durch Luft- und Knochenleitung gehört wird. Die Ströme, die möglichst sinusförmige Wechselströme sein mußten, um einfache Töne zu erzeugen, wurden für die tieferen Töne von einem Sinusinduktor, für die höheren von einer Wechselstromsirene, deren Bau und Wirkungsweise a. a. O. genau beschrieben ist, geliefert. Bei schwachem Strom ist der Ausschlag der Telephonplatte dem Strome proportional, die Tonintensität also proportional dem Quadrat der Stromamplitude und die Empfindlichkeit des Ohres für die jeweilige Schwingungszahl umgekehrt proportional dem Quadrat des Minimalstromes, der den Schwellenton erzeugt. Vorausgesetzt ist hierbei, daß der gehörte Ton tiefer ist als der erste Eigenton der Platte und daß die Länge des Gehörganges gegen die Wellenlänge zu vernachlässigen ist.

Was nun die äußeren Umstände bei der Bestimmung des geringsten, eben noch wahrnehmbaren Stärkegrades eines Tones betrifft, so muß in erster

S. 189; Gradenigo, Arch. f. Ohrenheilk. 30, 240, 1890; Max Wien, Pflügers Arch. f. Physiol. 97, 1 ff., 1903; vgl. ferner N. Vaschide, De l'audiométrie, Bulletin de Laryngol. etc. t. IV, 1901, chap. 5.

Linie für möglichste Stille der Umgebung Sorge getragen werden. Es ist eine alltägliche Erfahrung, daß die Perzeption eines Tones oder Geräusches durch das gleichzeitige Vorhandensein eines anderen Schalles beeinträchtigt, ja sogar völlig unmöglich gemacht werden kann. Wissenschaftliche Beobachtungen hierüber sind zuerst von A. M. Mayer[1]) angestellt worden, welcher angibt, daß ein tieferer Ton einen höheren zu verdrängen vermöge, nicht aber umgekehrt. Stumpf[2]) bestreitet die Richtigkeit dieser Behauptung, wenigstens in so extremer Form; das Summen einer tiefen Gabel ist neben hohen Zungenpfeifen unhörbar, und der Ton einer vor dem Ohre klingenden *C*-Gabel verschwindet, wenn eine *F*-Gabel von einer gewissen Tonstärke genähert wird. Soviel erscheint ihm jedoch richtig, daß der höhere Ton ein größeres Übergewicht an Empfindungsstärke besitzen muß, um den tieferen auszulöschen, als umgekehrt. In bezug auf die Unterdrückung von Tönen durch Geräusche bemerkt Kessel[3]), daß die drei untersten Oktaven, C_2 bis c, relativ leichter überdeckt werden als die folgenden und daß von c bis c^2 die Geräusche die Töne noch sehr beträchtlich beeinflussen, während dies von c^2 aufwärts schon weit weniger der Fall ist; die geringere Empfindungsstärke der tiefen Töne reiche aber nicht zur Erklärung dieses Unterschiedes aus.

Benachteiligen sich somit schon übermerkliche akustische Nervenprozesse gegenseitig in der Intensität der Empfindung, so wird dieses Verhältnis ganz besonders bei eben merklichen Schalleindrücken zu beachten sein. Es gehört allerdings zu den schwierigsten Aufgaben, zum Zwecke akustischer Beobachtungen völlige äußere Ruhe herzustellen. Selbst wenn man in einer windstillen Nacht dieses Ziel erreicht zu haben glaubt, wird man immer noch mittels Resonatoren die Existenz irgend welcher Geräusche konstatieren können. Dazu kommt, daß im Ohre selbst durch die Blutbewegung, durch gelegentliche Kontraktionen der Binnenohrmuskeln oder Erschütterungen der Gehörknöchelchenkette, vielleicht auch infolge von Stoffwechselprozessen fortwährend gewisse, wenn auch sehr schwache, Gehörsreize ausgelöst werden. Das Bemerken derselben (beim Fehlen von Schall in der Umgebung) hat Preyer[4]) als die Empfindung der Stille bezeichnet, die er im Gegensatz zu Fechner in Parallele zur Wahrnehmung des Augenschwarz bringt. Gerade wie das Sehen des letzteren eine positive Empfindung und verschieden von dem Nichtsehen sei, so wäre auch die Perzeption der Lautlosigkeit verschieden von dem Nichtshören schlechthin, und die entotischen Geräusche und Klänge verhielten sich zu dieser Empfindung wie die mannigfachen entoptischen Erscheinungen zur Wahrnehmung des Augenschwarz. Hiergegen läßt sich einwenden, daß die Summe der inneren Empfindungen des Ohres für sich unzweifelhaft dem gänzlichen Empfindungsmangel viel näher kommt als die der Eigenempfindungen der Retina, sofern man von vorübergehenden oder abnormen Intensitätssteigerungen absieht. Eine absolute Stille im Ohre scheint es indessen nach aller Erfahrung in der Tat nicht zu geben. In dieser Hinsicht könnte man die Frage nach der Größe der eben merklichen Tonstärke auch als ein Problem der Unterschiedsempfindlichkeit auffassen.

---

[1]) Nature, Vol. XIV, No. 354; Amer. Journ. of Science and Arts **12**, 329, 1876. — [2]) Tonpsychologie **2**, 227, 1890. — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 140. — [4]) Grenzen der Tonwahrnehmung, Jena 1876, S. 67.

Denn ein von außen das Gehörorgan treffender minimaler Schall wird erst dann imstande sein, ins Bewußtsein vorzudringen, wenn er sich von den innerlichen Erregungen in genügendem Grade abhebt.

Für eine exakte Bestimmung der Intensitätsschwelle ist neben der möglichst vollständigen Isolierung des betreffenden Tones auch noch die Konzentration der Aufmerksamkeit auf denselben erforderlich, also alles das nützlich, was einer Ablenkung entgegenwirkt. Wien hat daher mit Recht zu seinen früher erwähnten Versuchen intermittierende Töne benutzt. Denn eine gleichmäßig anhaltende Wahrnehmung entschwindet leicht dem Bewußtsein, während das Schwankende, überhaupt das Bewegte, auf allen Sinnesgebieten den inneren Blick, wenn man so sagen darf, auf sich zieht und fesselt. So werden bekanntlich Töne, welche schweben, aus einem Klange vielfach besser herausgehört, als wenn keine Stöße vorhanden sind. Ist aber die Aufmerksamkeit gespannt auf einen Ton gerichtet, so wird dieser dadurch geradezu verstärkt, wenn er nicht schon an sich sehr kräftig ist[1]), was zum Teil jedenfalls in der Abstraktion von den begleitenden Schallwahrnehmungen seinen Grund hat, zum Teil wohl auf noch unbekannten psychophysischen Prozessen beruht.

Es ist vielfach behauptet worden, daß die subjektive Intensität minimaler Gehörsempfindungen fortwährenden Schwankungen unterliege. Für Geräusche trifft dies unzweifelhaft zu. Entfernt man sich beispielsweise von einer gleichmäßig gehenden Taschenuhr bis fast ans Ende ihrer Hörweite, so kommt man an einen Punkt, wo die einzelnen Schläge bald lauter, bald leiser erscheinen und vorübergehend ganz ausfallen. Eine sichere Erklärung hierfür läßt sich zurzeit noch nicht geben; nur so viel steht fest, daß die Pausen nicht auf einem Versagen der Aufmerksamkeit beruhen, da sie auch bei angestrengtem Lauschen eintreten. Ob auch Tonempfindungen in der Nähe der Schwelle intermittieren, darüber sind die Ansichten geteilt. Politzer[2]), dem andere Ohrenärzte hierin beistimmen, spricht direkt von der schwankenden Perzeptionsfähigkeit des Hörnerven für schwache Schallvibrationen, wenn er auch den Einfluß äußerer Umstände, wie störende Geräusche, Kopfbewegungen, Ortswechsel der Schallquelle u. dgl., nicht ganz ausschließt. Hessler[3]) fand, daß die Töne von Stimmgabeln kurz vor dem völligen Ausklingen wellenförmig an- und abschwollen und daß der Rhythmus, in dem dies geschah, stets mit dem Herzschlag isochron war. Er beruft sich dabei auf Mach[4]) als Gewährsmann, der gleichfalls mit den Pulsstößen koinzidierende Tonschwankungen konstatiert habe. Diese Schwankungen betrafen aber überschwellige Töne und waren besonders deutlich bei kräftigem Pulse. Dagegen stimmt eine gelegentliche Angabe Preyers, die sehr hohe und sehr leise subjektive Töne betrifft, mit Hesslers Beobachtungen überein. Conta[5]), der die Hörzeit ausklingender Töne untersuchte, hat nichts von Tonschwankungen an der Schwelle mitgeteilt. Urbantschitsch[6]) gibt an, die Tonstärke steige und sinke abwechselnd beim Verklingen, der Ton pausiere auch zeitweilig ganz; jedoch sei dieses Verhalten von Herztätigkeit und

[1]) Vgl. hierzu Stumpf, Tonpsychologie **1**, 373 u. § 22. — [2]) Arch. f. Ohrenheilkunde **12**, 109. — [3]) Ebenda **18**, 233. — [4]) Wiener Ber., mathem.-naturw. Kl., **50**, (2), 348. — [5]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 111. — [6]) Zentralbl. f. d. mediz. Wissenschaften 1875, S. 625 f.

Respirationsbewegungen durchaus unabhängig. W. Heinrich[1]) ist wiederholt mit Nachdruck dafür eingetreten, daß eben noch hörbare Töne keinerlei Intensitätsschwankungen zeigten[2]), daß vielmehr, wo dies scheinbar der Fall sei, die Mitwirkung von Geräuschen schuld wäre. Ich selbst kann beim Horchen auf erlöschende Stimmgabeltöne, mögen dieselben durch Luftleitung oder durch Knochenleitung zum Ohre gelangen, ebenfalls keine Schwankungen konstatieren, oder wenigstens keine, die sich mit der Unregelmäßigkeit des eben merklichen Uhrentickens auch nur entfernt an Deutlichkeit messen könnten, und neige der Ansicht zu, daß es sich, wo solche auftreten, um momentane Störungen des Aufmerkens handelt. Bezüglich der Intensitätsänderungen mit dem Pulse ist wohl in erster Linie an individuelle Unterschiede zu denken[3]).

e) Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonstärken.

Es bleibt nun noch die Frage, wie sich die Empfindungsstärke eines Tones mit dem stetigen Wachsen oder Fallen der physikalischen Intensität verändert, mit anderen Worten die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonstärken zu erörtern. Auf dem Gebiete der Geräusche liegen mehrere entsprechende Untersuchungen vor, wovon später noch weiter die Rede sein wird; in betreff der Töne, die uns an dieser Stelle allein interessieren, ist dagegen nur eine Abhandlung zu erwähnen, nämlich die schon oben angeführte Dissertation von Max Wien über die Messung der Tonstärke[4]). Derselbe benutzte kurz aufeinanderfolgende Telephontöne, deren Stärkeverhältnisse bis auf Bruchteile von Prozenten meßbar waren. Die Versuche wurden meist nach der Methode der Minimaländerungen angestellt. Die Tonhöhen, welche zur Verwendung kamen, waren a, a^1 und e^1, jedoch betrifft die überwiegende Zahl der Beobachtungen den Kammerton. Es wurde zunächst als Ausgangsreiz ein sehr geringer Intensitätsgrad dieses Tones gewählt und dazu der eben merklich in der Stärke verschiedene Vergleichsreiz aufgesucht. Dann wurde der Ausgangsreiz auf das Zehnfache gesteigert und so fortgefahren bis zu sehr beträchtlichen Intensitätswerten. Trotzdem bei den Versuchen nach möglichster Vermeidung der verschiedenen Fehlerquellen gestrebt wurde, betrug der wahrscheinliche Fehler der einzelnen Einstellung doch etwa 15 bis 20 Prozent. Immerhin ergab sich aber im ganzen ein annäherndes Zutreffen des Weberschen Gesetzes von der Konstanz der relativen Unterschiedsschwelle.

f) Kürzeste Töne.

Wenn die Dauer eines physikalischen Tones ein gewisses Minimum nicht überschreitet, tritt keine Empfindung ein. Man kann also auch von einer Dauerschwelle reden. Savart[5]) dürfte der erste gewesen sein, welcher sich mit derselben beschäftigt hat. Mit Hilfe eines an einer Metall- oder Pappscheibe schleifenden Zahnrades fand er, daß schon zwei Impulse von dem Ohre als

[1]) Siehe Bulletin internat. de l'acad. des sciences de Cracovie 1900 (Jan.), S. 37 bis 45. — [2]) Zu demselben Resultat gelangte auch Wodtke bei Benutzung von Telephontönen. (Über Hörprüfung usw., Diss., Rostock 1878, S. 34.) — [3]) Vgl. hierzu noch C. Stumpf, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **21**, 115 ff. — [4]) Auch Ann. d. Phys. u. Chem., N. F., **36**, 843 ff., 1889. — [5]) Ann. de chim et phy.s. **44**, 348, 1830.

ein der Höhe nach bestimmbarer Ton aufgefaßt werden könnten. Villari und Marangoni[1]) knüpften an seine Versuche an. Sie meinten, daß bei denselben Nachschwingungen nicht ausgeschlossen wären, und benutzten daher Gabeln, deren Töne durch einen verschließbaren Kautschukschlauch beobachtet wurden. Der Verschluß des Schlauches wurde so lange gehoben, bis der Ton eben hörbar war, wobei die Zeit der Öffnung sich durch eine Registriervorrichtung genau bestimmen ließ. Als Tonquellen dienten die Gabeln d^1, e^2 und e^3. Die gefundenen Dauerminima waren für d^1 3,3, für e^2 5,0, für e^3 6,8 Schwingungen, wenn die Töne etwas leiser waren; bei größerer Stärke sanken die Zahlen auf bzw. 2,7, 4,1, 5,8. Da die Distanz der Gabeln je eine bzw. fast eine Oktave bildete und die Differenz der Dauerminima nahezu konstant war, so folgerten die Autoren, daß das gleiche Verhalten auch wohl für die übrigen Oktaven des Tonreiches zutreffen dürfe.

Mach[2]) versuchte, die Ermittelung der kleinsten zur Tonwahrnehmung nötigen Anzahl von Schwingungen in folgender Weise zu erreichen. Eine elektrische Gabel, eine Zungenpfeife oder sonst ein passendes Instrument wurde in einen schalldichten Kasten gebracht. Aus diesem trat der Ton durch ein gegabeltes Rohr heraus, dessen einer Zweig zu einem Koenigschen Brenner führte. Der andere Zweig ging hart bis an eine Pappscheibe und auf deren anderer Seite weiter bis zum Ohre des Beobachters. Die Scheibe hatte einen radialen Ausschnitt und trug einen gegen die Achse geneigten Spiegel, in den man durch den Ausschnitt hineinsehen konnte. Wurde sie in Rotation versetzt, so hörte man den Ton nur, während der Ausschnitt das Rohr passierte, und konnte dabei zugleich die Schwingungen, die vernommen wurden, an den Flammenbildern im Spiegel zählen. Erhielt das Ohr zu wenig Schwingungen, so resultierte nur ein trockener Schlag, an dem keine Tonhöhe mehr zu unterscheiden war. Das c^1 war als solches erst bei vier bis fünf Schwingungen erkennbar. Bei tiefen Tönen traten die Obertöne noch deutlich hervor, wenn der Grundton wegen zu großer Kürze bereits verschwunden war.

Eine wesentlich höhere Dauerschwelle fand S. Exner[3]). Er ließ, um möglichst reine Töne zu bekommen, den Ton einer elektrischen Gabel durch einen Resonator in einen Kautschukschlauch und aus diesem ins Ohr des Beobachters treten. Der Schlauch war vor dem Versuch abgeklemmt und konnte durch eine Fallvorrichtung für eine sehr kurze, übrigens variable und meßbare Zeit geöffnet werden. Es ergab sich, daß der Ton von 128 Schwingungen dann die erste Spur einer Tonempfindung von spezifischer Höhe erzeugte, wenn rund 17 Wellen das Ohr trafen. Die tiefere Oktave, *C*, erforderte ebensoviel Schwingungen, also die doppelte Zeit der Einwirkung auf das Gehör.

J. v. Kries und F. Auerbach[4]) gelangten auf Grund ihrer psychophysischen Reaktionsversuche zu der Anschauung, daß zunächst neun bis zehn Schwingungen stattfinden müßten, bis die Bewegung in den Endapparaten des Acusticus ausreichend geworden sei, um überhaupt einen psychischen

---

[1]) Il nuovo Cimento **28**, (2), I, 382—398, 1868/69. — [2]) Lotos **23**, 146, 1873. — [3]) Pflügers Arch. **13**, 232 f., 1876. — [4]) Du Bois-Reymonds Arch. f. Physiol. 1877, S. 297; vgl. auch F. Auerbach, Wiedemanns Ann. **6**, 591, 1879.

Effekt auszulösen. Dabei sei diese Zahl unabhängig von der Tonhöhe, aber abhängig von der Intensität der Erregung zu denken. Für die Auffassung der Empfindung als einer solchen von bestimmter, von anderen unterscheidbarer Tonhöhe wären dann aber noch weitere 10 Schwingungen notwendig. Im ganzen stimmen also diese Autoren mit Exner dahin überein, daß ungefähr 20 Schwingungen zur Erkennung eines Tones erforderlich seien.

Demgegenüber sind sämtliche späteren Forscher auf verschiedenen Wegen der Untersuchung zu dem gleichen Resultate gekommen, daß zwei Schwingungen bereits zur Tonperzeption genügen. Zunächst ist hier Pfaundler[1]) zu nennen, dem sich Oppel[2]) vollständig anschloß. Pfaundler konstruierte eine Seebecksche Sirene mit neun konzentrischen Löcherreihen. Die äußerste enthielt 72 gleich weit abstehende Löcher, die zweite war ebenso beschaffen, nur fehlte je das neunte Loch, die dritte desgleichen, nur fehlte je das achte und neunte Loch und so fort. Blies man die Reihen nacheinander an, so hörte man den Ton 72 der ersten Reihe auch noch aus dem Klange der folgenden, bis zur siebenten einschließlich, obwohl mit abnehmender Deutlichkeit, heraus. Bei der achten, in welcher der Ton 72 nur noch durch eine achtmalige Wiederkehr von je zwei Impulsen pro Umdrehung repräsentiert war, wurde seine Wahrnehmung unsicher. Durch eine Nachahmung der bekannten Baumgartenschen Reflexionstöne an der Sirene überzeugte sich Pfaundler aber schließlich davon, „daß im Minimum zwei Schallimpulse auf die mitschwingenden Teile des Ohres genügen können, um die Empfindung eines Tones hervorzurufen, und daß diese Empfindung durch rasche Wiederholung zum Bewußtsein gebracht werden kann".

Läßt man wiederholt zwei gleichartige Geräusche sehr schnell, aber ungleich schnell, aufeinander folgen, so verbindet sich mit der Wahrnehmung der Succession immer eine Tonhöhenempfindung und zwar jedesmal eine andere. Hierauf ist von verschiedenen Autoren aufmerksam gemacht worden. Exner[3]) benutzte zur Feststellung der kleinsten noch wahrnehmbaren Zeitdifferenz zwischen zwei gleichen Gehörsreizen unter anderem überspringende elektrische Funken. Ein Intervall von 0,002 Sekunden zwischen je zweien war eben noch merklich. Wuchs die Zeitdistanz, so hatte man den Eindruck, daß das Geräusch des Doppelschlages tiefer wurde. Beobachtungen dieser Art, wozu auch die Tonempfindungen zu zählen sind, welche z. B. entstehen, wenn man mit einem Bleistift oder dem Fingernagel über kurze Strecken gerippten Papiers fährt, legen schon an sich den Schluß nahe, daß zwei Impulse zu einer Tonwahrnehmung ausreichen. Exner selbst scheint freilich diesem Schlusse nicht recht zustimmen zu wollen, aber, wie ich glaube, mit Unrecht. Denn, wenn er sagt[4]), man habe bei den Doppelfunkenversuchen zwar eine Höhenempfindung, aber keine eigentliche Tonempfindung, so beruht dieses Urteil wohl nur darauf, daß sich ein enorm kurzer Ton eben anders anhört als ein gewöhnlicher; und wenn er weiter anführt, daß zwei aufeinanderfolgende Funken keinen Ton erzeugen könnten, da nach seinen Erfahrungen auch 32 bzw. 64 pro Sekunde aufeinanderfolgende Funken keinen

[1]) Wiener Sitzungsber., mathem.-naturw. Kl., **76**, (2), 561, 1878; über ähnliche Versuche von Seebeck und kritische Bemerkungen dazu siehe Ohm, Pogg. Ann. **59**, 554 f. — [2]) Jahresber. d. Physikal. Vereins zu Frankfurt a. M. 1879/80, S. 30. — [3]) Pflügers Arch. **11**, 417 f., 1875. — [4]) Ebenda **13**, 240.

Ton von 32 bzw. 64 Schwingungen lieferten, so ist dagegen zu bemerken, daß die Töne 32 und 64 in den fraglichen Versuchen offenbar nur zu leise waren, um herausgehört zu werden.

Kohlrausch[1]) hat denn auch in einer kurzen Publikation über das Hervorbringen von Tönen durch Doppelschläge, die mit den Fingern gegen eine feste Masse geführt werden, direkt ausgesprochen, daß Töne schon durch zwei Impulse entstehen könnten. Er bestätigte dies bald darauf durch eine sorgfältige experimentelle Untersuchung[2]), bei welcher eine Vorrichtung nach dem Muster des Savartschen Verfahrens die Grundlage der Versuchsanordnung bildete und die den zwei Impulsen entsprechenden Tonhöhen durch Vergleichen mit Saitentönen bestimmt wurden. Die Untersuchung ergab außerdem, daß für ein Ohr von mittlerer Feinheit die mögliche Schärfe in der Definition der Höhe eines Tones von 2 bis zu 16 Schwingungen, darüber hinaus aber nicht mehr zunimmt. Hiernach könnte der Umstand, daß einzelne Beobachter mehr als zwei Schwingungen zur Erkennung der Tonhöhe nötig gefunden haben, vielleicht auf einen gewissen Mangel an Übung in der raschen und genauen Bestimmung von Tonhöhen zurückzuführen sein.

Cross und M. Maltby[3]) verbanden zwei Telephone zu einem Stromkreise. Auf die Platte des einen wurde eine tönende Gabel, c^1 oder c^2, aufgesetzt, an dem anderen wurde gehört. Ein Unterbrecherrad bewirkte, daß der Strom immer nur für eine kurze Zeit, die sich aus der Rotationsperiode des Rades berechnen ließ, zum Hörtelephon gelangte. Störende Nebengeräusche waren beseitigt. Es wurde gefunden, daß für c^1 0,88 und für c^2 1,76 Schwingungen hinreichten, um den betreffenden Ton in 70 bis 80 Proz. der Fälle richtig zu erkennen. Der wichtigen Frage, ob nicht etwa Nachschwingungen der Telephonplatte stattfanden, haben die Autoren besondere Aufmerksamkeit zugewendet. Mittels eines die Lissajousschen Figuren zu Hilfe nehmenden Verfahrens ließ sich zeigen, daß es nicht der Fall war. Die Dauerschwellen sind auffallend niedrig, doch meint auch R. Schulze[4]), daß ein Ton bei 1,8 Schwingungen bereits in seiner Höhe charakterisiert sei, während andererseits Herroun und Yeo[5]) wieder zwei Tonschwingungen als Minimum perceptibile angegeben haben.

Im Anschluß an gelegentliche Versuche von Max Meyer[6]), der für die Bestimmung des Tones von 176 Schwingungen fünf Impulse, für 352 Schwingungen dagegen nur drei und für den Ton 704 nur noch zwei nötig fand, hierbei aber wie Kohlrausch konstatierte, daß die Töne mit zunehmender Zahl der Impulse an Deutlichkeit gewinnen, haben Abraham und Brühl[7]) mit Hilfe der Löchersirene eine den größten Teil des Tongebietes umfassende Untersuchung über unseren Gegenstand ausgeführt, wobei das absolute Tonbewußtsein des ersteren die Feststellung der in Frage kommenden Tonhöhen ganz wesentlich erleichterte. Die Ergebnisse waren die folgenden. Von der Kontraoktave bis zur Mitte der viergestrichenen genügten zwei Schwingungen für eine Tonempfindung und die (immer exakt kontrollierte) Beurteilung ihrer Höhe. Eine mehrfache Wiederholung der zwei Luftstöße war nicht, wie

[1]) Wiedemanns Ann. **7**, 335, 1879. — [2]) Ebenda **10**, 1, 1880. — [3]) Proceed. Amer. Acad. Boston **19**, 222—235, 1891. — [4]) Wundts Philos. Stud. **14**, 487, 1898. — [5]) Proc. Roy. Soc. **50**, 318—323, 1892. — [6]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **11**, 207 ff. — [7]) Ebenda **18**, 177, 1898.

Pfaundler meinte, erforderlich, obwohl die Urteilszeit dadurch allerdings geringer wurde. Von der Mitte der viergestrichenen Oktave an stieg die Minimalzahl der Schwingungen stetig. Die sehr kurzen Töne waren schwächer als länger dauernde von gleicher Höhe und erschienen hinsichtlich der Klangfarbe milder und weniger spitz. Nachschwingungen und Reflexionswellen erwiesen sich als belanglos für die Tonempfindung.

Ein Überblick über alle hier erwähnten Arbeiten wird uns zu dem Schlusse veranlassen, daß zwei Schwingungen zur Erkennung eines Tones im allgemeinen hinreichen. Wenn einige Forscher eine größere Anzahl angegeben haben, so mag dies, wie schon angedeutet, auf individuellen Schwankungen in der Fähigkeit, Tonhöhen schnell aufzufassen, beruhen, vielleicht auch auf erschwerenden Eigentümlichkeiten ihrer Versuchstechnik. Was speziell die komplizierte Methode von Auerbach und v. Kries anlangt, so hat Götz Martius[1]) auf Grund ähnlicher Versuche sich dahin ausgesprochen, daß deren Resultate in betreff der Dauerschwelle der Tonwahrnehmung hinfällig seien, und hält auch seinerseits, obschon mit einer gewissen Unsicherheit, drei Schwingungen für ausreichend.

g) Anklingen und Abklingen.

Als sicher festgestellt ist die Tatsache zu betrachten, daß eine Tonempfindung in den ersten Momenten ihres Bestehens mit jeder folgenden Schwingung sowohl an Klarheit bezüglich der Tonhöhe als auch an Stärke zunimmt. Es findet also wie bei den Gesichtswahrnehmungen ein Anklingen der Empfindung statt. Bei seinen Versuchen über die minimale zur Tonperzeption nötige Anzahl Wellen konstatierte Exner zugleich, daß der Ton *C*, allmählich lauter und lauter werdend, erst bei ungefähr 44 Schwingungen das Maximum der subjektiven Intensität erreichte; bei der Oktave c^0 waren hierfür nahezu ebensoviel Impulse, nämlich etwa 48, erforderlich. Dabei hatte er den Eindruck, als wachse die Stärke anfangs sehr schnell, später recht langsam, weshalb es auch schwierig war, das Maximum präzise zu fixieren. Für das qualitative Deutlicherwerden der Tonempfindungen mit der Zunahme der Tondauer ist die folgende, von Max Meyer am angeführten Orte unter ähnlichen mitgeteilte Beobachtung besonders bezeichnend. Bestand bei einem, den Ton f^1 betreffenden Sirenenversuche die Periode aus zwei Löchern, „so hatten die Stöße keine Spur von Toncharakter; bei drei Löchern machte sich etwas Tonähnliches in dem Geräusch geltend; bei vier Löchern begannen die Stöße die verlangte Tonhöhe anzunehmen, aber noch schwach und undeutlich; bei fünf Löchern . . . war die Höhe der Tonstöße klar erkennbar". Auf die Schwäche einer eben beginnenden Tonempfindung machen ja auch Abraham und Brühl aufmerksam und erblicken in ihr eine wesentliche Ursache für die Schwierigkeit der Unterscheidung zwischen einem äußerst kurzen Tone und einem Geräusche.

Urbantschitsch[2]) studierte die Erscheinung des Anklingens an Gesunden und an Ohrenkranken mit Stimmgabeltönen von verschiedener Stärke. Dabei zeigte sich, daß ein sehr leiser Ton erst nach ein bis zwei Sekunden

[1]) Wundts Philos. Stud. **6**, (3), 394 und **7**, (3), 469, 1891. — [2]) Pflügers Arch. **25**, 323 bis 342, 1881.

in seiner vollen Intensität wahrgenommen wurde. Kam die physikalische Stärke dem Schwellenwerte nahe, so hörte man den Ton im Beginne seiner Zuleitung überhaupt nicht, und erst nach einer von dem Grade der Schwäche abhängigen Zeit erklang derselbe zunächst leise und bald darauf deutlich. Übrigens traten hierbei individuelle Unterschiede zutage. Noch viel auffälliger als an normalen Personen erschien ein verspätetes Anklingen bei Schwerhörigen, die an Erkrankungen des Mittelohres litten. Manche von diesen hörten eine kräftig tönende Gabel oder eine laut tickende Uhr erst nach 5, 8 oder gar 10 Sekunden; dabei entstand die Empfindung zuweilen an dem einen Ohre auffallend früher als am anderen, so daß bei binotischer Schallperzeption eine Art Echo oder ein Doppelschall beobachtet wurde. Auch ein anderer, durch seine Beiträge zur physiologischen Akustik bekannter Ohrenarzt, Dennert, hat Versuche über die Tondauer oder, wie er es nennt, das Schallquantum angestellt und die Bedeutung desselben für die Hörprüfung erörtert[1]). Er führte die Tonquelle, eine klingende Gabel, vor dem Ohre des Patienten hin und her, so daß sie nur stoßweise vernommen wurde. War sie bei dem betreffenden Rhythmus der Intermissionen für den Hörer abgeklungen, so erschien der Ton immer noch wieder eine längere oder kürzere Zeit von neuem, wenn die Gabel langsamer bewegt wurde und daher jedesmal eine größere Zahl von Schwingungen in den Gehörgang gelangte. Je geringer also die Hörschärfe und je leiser der Ton ist, um so mehr Schwingungsimpulse müssen sich zum Zwecke des Anklingens summieren.

Dem Anklingen steht nun ein Abklingen gegenüber, d. h., wenn der physikalische Ton plötzlich aufhört, so ist damit nicht auch zugleich die Empfindung zu Ende, sondern sie überdauert den Reiz noch eine gewisse Zeit. Helmholtz weist in seiner „Lehre von den Tonempfindungen“ darauf hin, daß die maximale Geschwindigkeit, mit der zwei Töne im Triller abwechseln können, ohne dabei für das Ohr ineinander zu verschwimmen, als eine Art Maßstab für die Dauer des Abklingens anzusehen ist. Denn je kürzer die letztere, um so rascher dürfen offenbar die Töne alternieren. Triller von je zehn Schlägen in der Sekunde seien im größten Teile der Skala scharf und klar auszuführen, aber von *A* abwärts in der großen und Kontraoktave klängen sie schlecht und rauh und beginne die Vermischung. Hieran wäre nicht der Mechanismus der Instrumente schuld, da sowohl beim Triller auf dem Harmonium wie auf dem Violoncell die Töne momentan einsetzen und aufhören; der Grund sei vielmehr in einer Eigentümlichkeit des Ohres zu suchen, der zufolge den tieferen Tönen eine längere Abklingezeit zukäme als den höheren.

Genauere Versuche hat erst Alfred M. Mayer angestellt, und zwar über die Frage, ein wie schnelles Tremolo man in den verschiedenen Oktaven mit dem Ohre noch erfassen kann. Unterbricht man einen Ton durch eine Reihe von Pausen, die in gleichen und nicht zu kleinen Intervallen einander folgen, so hört man ihn, in einzelne Stöße zerlegt, schwebend. Steigert sich die Zahl der Intermissionen in der Zeiteinheit mehr und mehr, so gehen die anfangs distinkten Stöße zunächst in eine scharfe Rauhigkeit über, dann wird diese milder und zuletzt verschwindet sie, so daß der

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. 34, 161, 1893.

Ton wieder glatt erscheint. Mayer suchte nun stets die Grenze der Rauhigkeit gegen die Glätte auf. Die dabei benutzte Versuchsanordnung ähnelt im Prinzip der von Mach zur Bestimmung der Dauerschwelle verwendeten Methode; eine Gabel tönte vor einem Resonator, von dem eine Rohrleitung zum Ohre des Beobachters führte, und eine zwischengeschaltete, mit Ausschnitten versehene, rotierende Scheibe bewirkte, daß der Ton bald durchgelassen, bald abgesperrt wurde. Die letzte [1]) der mehrfachen Publikationen enthält folgendes Resultat. Bezeichnet D (Duration of the residual sensation) die Dauer der Pause zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Tonstößen, die eben kurz genug ist, um nicht mehr als Intermission empfunden zu werden, so ergab sich

für	C	von	64	Schwingungen	D	gleich	$\frac{1}{26{,}9}$ Sekunde
„	c	„	128	„	„	„	$\frac{1}{43{,}2}$ „
„	c^1	„	256	„	„	„	$\frac{1}{74{,}4}$ „
„	e^1	„	320	„	„	„	$\frac{1}{87{,}5}$ „
„	g^1	„	384	„	„	„	$\frac{1}{105{,}6}$ „
„	c^2	„	512	„	„	„	$\frac{1}{130}$ „
„	e^2	„	640	„	„	„	$\frac{1}{151{,}2}$ „
„	g^2	„	768	„	„	„	$\frac{1}{171{,}6}$ „
„	c^3	„	1024	„	„	„	$\frac{1}{204}$ „

Aus diesen empirischen Werten ließ sich die allgemeine Formel $D = \left[\frac{33{,}000}{N + 30} + 18\right] \cdot 0{,}0001$ ableiten, worin N die Schwingungszahl bedeutet. Doch fügt Mayer hinzu, daß andere vielleicht zu etwas abweichenden Zahlen gelangen möchten.

In der Tat trifft dies für Urbantschitsch [2]) zu, der aber auch nicht die Frage stellte, wann bei stetiger Verringerung der Pause aus zwei Tonstößen einer wird, sondern wann umgekehrt bei kontinuierlicher Vergrößerung der zunächst einheitliche Ton sich in zwei spaltet, was immerhin einen Unterschied macht. Urbantschitsch verfuhr so. Zwei Röhrchen wurden durch einen gegabelten Schlauch gleichzeitig mit dem Ohre eines Beobachters verbunden (oder auch jedes mit je einem der Ohren). Vor ihren freien Mündungen ward mit Hilfe eines Pendels die Öffnung eines anderen Rohres vorübergeführt, aus welcher der Ton der Schallquelle herausdrang. Der Hörer vernahm den Ton erst durch das eine, dann durch das andere Empfangs-

[1]) Philos. Magaz. (5), **37**, 259 u. 411, 1894; Amer. Journ. of Science (3), **47**, 1 und 283, 1894. — [2]) Pflügers Arch. **25**, 326 ff., 1881.

röhrchen, und zwar je nach der leicht zu berechnenden Geschwindigkeit der Succession entweder als Doppelschlag oder als einzelnen Tonstoß ohne Wahrnehmung der Pause. Die Versuche betrafen freilich nur die Töne *C*, *Dis*, *c* und *dis*, doch zeigte sich in Übereinstimmung mit der Formel Mayers auch hier, daß die oben mit *D* bezeichnete Größe mit wachsender Tonhöhe abnimmt. Wurde der eine Tonstoß dem einen, der zweite dem anderen Ohre zugeleitet, so ergaben sich durchweg höhere Zahlen. Bei monotischem Hören wird also die Spaltung viel eher bemerkt als bei diotischem, womit eine frühere analoge Beobachtung Exners, die Geräusche zum Gegenstande hatte, in Einklang steht.

Man pflegt die Versuche von Mayer und Urbantschitsch dahin auszulegen, daß die höheren Töne rascher abklingen und eben deswegen, wenn keine Pause hörbar werden soll, einander schneller folgen müssen als die tieferen. Indessen erscheint mir diese Folgerung nicht ganz einwandfrei. Stellen wir uns den Vorgang des Anklingens einer Tonempfindung, ihres Verweilens auf der Höhe der Intensität und des darauf folgenden Abklingens graphisch vor, wobei die Zeiten die Abszisse bilden und die Intensitäten durch die Ordinaten dargestellt werden, so bekommen wir eine Kurve, die zunächst ansteigt, dann eine Weile der Abszisse parallel läuft und zuletzt wieder zu ihr heruntersinkt. Nur wenn man in jedem Falle Form und Länge dieses absteigenden Schenkels genau kennt, hat man ein klares Bild von der Art des Abklingens. Bei den Beobachtungen Mayers folgt aber eine Reihe von Tonstößen so rasch aufeinander, daß immer die anklingenden Ordinaten des folgenden mit abklingenden des vorhergehenden zusammenfallen und sich summieren, und die Geschwindigkeit der Succession ist gerade so abgepaßt, daß diese Summierung eine Tonempfindung von gleichmäßiger Intensität ergibt, also eine Kurve, die fortwährend der Abszisse parallel ist oder doch wenigstens keine merklichen Senkungen aufzuweisen hat. Über die Gestalt der Kurvenkomponenten erfährt man auf diese Weise nichts Genaueres. Allenfalls könnte man aus den Angaben von Mayer und Urbantschitsch den Schluß ziehen, daß bei höheren Tönen die Kurve der Empfindungsstärke nach dem Aufhören des Reizes steiler abfalle und des Ausgleiches halber die einzelnen Tonstöße einander zeitlich näher gerückt werden müßten. Allein bei derartigen Versuchen folgen sich die Tonstöße so schnell, daß die Empfindung überhaupt nur mehr oder weniger unvollkommen anklingt. Die doch in erster Linie zu beantwortende Frage, wie eine Tonempfindung abklingt, die eine Zeitlang in der vollen, der Reizgröße entsprechenden Intensität perzipiert worden ist, wird also durch die Mayer-Urbantschitschsche Technik gar nicht berührt. Dazu kommt noch, daß bei Mayers Anordnung neben dem intermittierenden Tone physikalisch die beiden sogenannten Variationstöne entstehen, die den Primärton zwischen sich fassen und mit ihm bzw. miteinander unter geeigneten Bedingungen schweben, wodurch die ganze Beobachtung noch erheblich kompliziert wird. Beiläufig bemerkt, war Mayer sich übrigens durchaus bewußt, daß seine Methode nicht geeignet sei, das Abklingen der Tonempfindungen vollständig klarzustellen.

Abraham und ich [1]) haben mit Hilfe von Löchersirenen untersucht, wie

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **20**, 408, 1899.

rasche Triller man in den verschiedenen Oktaven hören kann. Die Beobachtungen erstreckten sich von der Kontraoktave bis in die viergestrichene und betrafen alle Intervalle von der kleinen Sekunde bis zur Quinte. Sie wurden in der Weise ausgeführt, daß gleichzeitig zwei Löcherkreise angeblasen wurden, in deren jedem Gruppen von offenen mit Gruppen von verschlossenen Löchern alternierten. War eine Serie von Öffnungen des einen Kreises vor dem zugehörigen Anblaserohr vorübergegangen, so folgte in diesem Kreise eine Pause, dafür begann aber sofort im anderen Kreise das Anblasen einer Gruppe von Öffnungen, und so immer abwechselnd. Es ergab sich, daß jeder der beiden Trillertöne eine physikalische Dauer von mindestens 30 σ haben mußte, wenn eine getrennte Wahrnehmung möglich sein sollte. Bei kürzerer Dauer verschmolzen die Töne zu einem rauhen Akkorde. Der Wert von 30 σ gilt für alle geprüften Intervalle und für alle Tonhöhen mit Ausnahme der höchsten und tiefsten, für welche letzteren wir rund 40 σ erhielten. Man kann hiernach in der mittleren Region des Tonreiches überall gleich schnell trillern. Auf den ersten Blick scheint dieses Resultat den Versuchen von Mayer, die Abraham übrigens kontrolliert und bestätigt hat, zu widersprechen. Indessen bleibt zu bedenken, daß wir auch unter anderen Bedingungen experimentierten als jener. Wir ließen nicht Töne von derselben, sondern von verschiedener Höhe aufeinander folgen, und es fanden zwischen den einzelnen Tonstößen keine Unterbrechungen statt. Vor allem aber wurde nicht gefragt, wann bei wachsender Geschwindigkeit der Succession der Eindruck ein einheitlicher wird, sondern wie lange die Töne neben den aus der Vermengung der abklingenden mit den anklingenden Empfindungen entstehenden Akkorden gesondert hörbar bleiben. Immerhin bedürfen die Erscheinungen, die bei raschen Folgen von Tonstößen auftreten, und der Vorgang des Abklingens von Tonempfindungen noch sehr der weiteren Untersuchung [1]). Wenn Abraham [2]) aus unseren gemeinschaftlichen Versuchen die Konsequenz gezogen hat, daß alle Töne, unabhängig von ihrer Höhe, dieselbe Abklingezeit haben, so vermag ich vorderhand diesen Schluß nicht als zwingend anzuerkennen.

h) Nachempfindungen.

Bei einzelnen, hierzu disponierten Personen kommt es nach Urbantschitsch [3]) vor, daß das Abklingen sich erheblich verzögert, und zwar betrifft diese Erscheinung manchmal nur gewisse Töne, in der Regel aber sämtliche. Die Dauer des Nachklingens oder, wie Urbantschitsch es auch nennt, der primären Nachbilder, beläuft sich dabei zuweilen auf 1 bis 2 Sekunden, gelegentlich sogar auf 10 bis 15; ja in einem Falle klang ein hoher Stimmgabelton erst nach 19 Sekunden ab. Häufiger als die primären Nachbilder beobachtete Urbantschitsch [4]) sekundäre, intermittierende. Sie sind dadurch charakterisiert, daß eine abgeklungene Tonempfindung nach einiger Zeit nochmals oder mehrere Male wieder auftaucht. Das Nachbild hat dann meist dieselbe Tonhöhe wie das Vorbild, es kann aber

[1]) S. hierzu Marbe, Pflügers Arch. **100**, 551, 1903. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **20**, 417, 1899. — [3]) Pflügers Arch. **25**, 335 f., 1881. — [4]) Ebenda **24**, 585, 1881.

auch höher oder tiefer sein. Die Stärke ist gewöhnlich bedeutend geringer als die des anfänglichen Tones, und folgen mehrere Nachbilder aufeinander, so pflegen sie verschiedene Intensität zu besitzen. Die Nachempfindung tritt in der Regel leise auf und steigt schnell an, wie wenn ein Ton aus weiter Ferne rasch näher käme, worauf sie sich allmählich oder auch plötzlich wieder verliert. Die Dauer der ganzen Erregung vom Verschwinden des objektiven Tones bis zum Ende des letzten Nachbildes beträgt im Durchschnitt 1 bis 2 Minuten, die Dauer des einzelnen Nachbildes 5 bis 10 Sekunden. Die erste Nachempfindung stellt sich gewöhnlich innerhalb der ersten 15 Sekunden nach Entfernung der Tonquelle ein, die zweite nach weiteren 10 bis 20 Sekunden. Indessen kommen in jeder Beziehung beträchtliche individuelle Unterschiede vor. Dies gilt besonders auch von der Zahl der Nachbilder, von denen meist zwei oder drei, unter Umständen aber sogar mehr als acht auftreten.

Neben den detaillierten Angaben von Urbantschitsch finden sich in der Literatur eigentlich nur gelegentliche Notizen über akustische Nachempfindungen. So teilt Stumpf in seiner Tonpsychologie mit, daß er bei langer und starker Einwirkung einer Stimmgabel auf das eine Ohr regelmäßig eine Nachempfindung im anderen Ohre habe, die eine ganze Minute dauern könne, und Preyer erwähnt, daß Schwebungen, namentlich hoher Töne, bei ihm noch am Tage nach den Versuchen entotisch wiederkehrten. Ich selbst kann von mir berichten, daß ich einmal nach anhaltenden binaurealen Beobachtungen, die das durch Telephone auf die Ohren übertragene Geräusch des Neefschen Hammers betrafen, in der folgenden Nacht längere Zeit mit peinlicher Deutlichkeit das charakteristische Telephonsummen im Hinterkopfe hörte. Man kann im Zweifel sein, ob man solche Vorkommnisse noch zu den akustischen Nachbildern rechnen oder als Halluzinationen auffassen soll. Daß aber die ersteren von den Personen, die sie an sich beobachten, etwa mit lebhaften Tonvorstellungen verwechselt würden, weist Urbantschitsch auf Grund positiver Erfahrungen ausdrücklich zurück. Mit Nachschwingungen des Cortischen Organes können andererseits die Nachempfindungen schon deswegen nicht erklärt werden, weil, wenn mehrere Töne gleichzeitig als Nachbild auftreten, Schwebungen und Kombinationstöne dabei vollständig fehlen, eine auch sonst theoretisch interessante Tatsache, die Urbantschitsch wiederholt konstatiert hat. Am wahrscheinlichsten wird die Ursache der akustischen Nachempfindungen in einer erhöhten Erregbarkeit der Neuronen der Hörbahn zu suchen sein, die entweder die Folge einer peripheren Erkrankung oder einer allgemeinen nervösen Reizbarkeit ist, offenbar aber einen Ausnahmezustand bildet, da sonst die akustischen Nachbilder ebenso häufig vorkommen müßten wie die optischen.

i) Ermüdung.

Ein kontinuierlich oder gleichmäßig intermittierend das Ohr treffender Schallreiz von längerer Dauer pflegt nach einiger Zeit nicht mehr perzipiert zu werden. Man hat diese Erscheinung vielfach mit einer Ermüdung des Nerven identifiziert, aber im allgemeinen mit Unrecht. Es handelt sich zumeist lediglich um ein Schwinden der Aufmerksamkeit, das konstanten Empfindungen aller Sinnesgebiete gegenüber leicht eintritt. Wir überhören die

unausgesetzt neben uns tickende Uhr, weil andere Dinge uns beschäftigen, aber wir merken es trotzdem, wenn sie stehen bleibt, was natürlich bei einer wirklichen Betäubung des Ohres ausgeschlossen wäre. Man kann einen Ton, sofern man nur fortwährend oder immer wieder auf ihn achtet, eine halbe Stunde und länger hören, ohne daß er zuletzt schwächer erscheint als am Anfange. Falls dabei tatsächlich eine Herabsetzung der subjektiven Intensität durch Ermüdung des Nerven stattfinden sollte, so ist sie doch zu gering oder geht zu allmählich vor sich, um wahrnehmbar zu sein. J. J. Müller [1]) gibt an, daß eine Stimmgabel weicher, leerer und schwächer klinge, nachdem das Ohr vorher durch das Hören der Oktave und Duodezime erschöpft sei, und Mach hat mehrfach [2]) darauf hingewiesen, daß bei längerer Perzeption eines Tones die Obertöne nach und nach in voller Klarheit hervorträten, weil das Ohr der Beachtung eines einzigen Tones müde würde. Es scheint mir jedoch fraglich, ob man es hierbei wirklich mit einer peripheren und nicht vielmehr mit einer zentralen Ermüdung zu tun hat, und das gleiche muß ich von dem folgenden Versuche Machs [3]) sagen. „Ein Gehilfe schlägt mit dem Hammer auf den Tisch, während wir mit dem Finger beide Gehörgänge zudrücken. Öffnen wir die Gehörgänge 0,5 bis 1 Sekunde nach dem Aufschlagen, so hören wir den Schall neu entstehen. Wir können nach dem Aufschlagen einige Male die Gehörgänge rasch öffnen und schließen und hören bei jedem Öffnen einen Schlag, der natürlich desto schwächer ausfällt, je später das Öffnen nach dem Aufschlagen erfolgt. Dies erklärt sich aus dem im Zimmer fortbestehenden allmählich abnehmenden Schallvorgang, der nur von dem nicht ermüdeten Organ bemerkt wird, oder wenn das Organ kurze Zeit Gelegenheit hatte, sich zu erholen." Ich möchte doch meinen, daß der objektive Nachhall im Zimmer, solange er eine überschwellige Stärke besitzt, auch für gewöhnlich gehört wird und nur im Bewußtsein gegen den ersten stärksten Eindruck zurücktritt.

Ebenso erscheint es mir wenig wahrscheinlich, daß das Gehörorgan durch so kurze und schwache Erregungen, wie verklingende Stimmgabeln sie hervorrufen, zu ermüden sein sollte. In dieser Beziehung ist in der otiatrischen Literatur wiederholt darauf aufmerksam gemacht worden, daß, wenn eine auf den Warzenfortsatz aufgesetzte Stimmgabel für das betreffende Ohr verklungen ist, der Ton nach Abnehmen und Wiederaufsetzen der Gabel auf dieselbe Stelle von der Versuchsperson aufs neue und so eventuell noch mehrmals deutlich gehört wird. Corradi [4]), der sich besonders mit diesem Gegenstande beschäftigt und die eigentümliche Erscheinung nicht nur bei Ohrenkranken, sondern auch bei Gesunden nicht selten gefunden hat, sucht dieselbe damit zu begründen, daß der Hörnerv sich eben von Zeit zu Zeit ausruhen müsse und daß die Ursache ohne Zweifel in den anatomischen und physiologischen Verhältnissen liege. Bei einigen an mir und von mir an zwei gutgeschulten Beobachtern angestellten Versuchen ergab sich, daß die Gabel meistens schon nach dem ersten Erlöschen definitiv unhörbar war; nur zuweilen wurde beim zweiten Aufsetzen wieder eine schwache Spur des Tones

[1]) Ber. d. K. sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Kl., 1871, II bis III, 115 bis 124. — [2]) S. z. B. seine Einleitung in die Helmholtzsche Musiktheorie, 1867, S. 29. — [3]) Lehre von den Bewegungsempfindungen, 1873, S. 58. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. 30, 175, 1890.

vernommen. Eine bestimmte Regel ließ sich nicht finden. Doch habe ich den Eindruck gewonnen, als käme das Wiederauftauchen der Empfindung nur dann vor, wenn beim ersten Male das Urteil „verklungen" aus irgend welchen Gründen, wie Abschweifen der Aufmerksamkeit, Störung durch anderen Schall, Lockerung des Gabelstieles od. dgl., vorschnell abgegeben ist. Die tieferen Gabeln — hohe verklingen für das in Rede stehende Experiment überhaupt zu schnell — schwingen relativ lange, und die Abnahme der Amplitude geht um so langsamer vor sich, je mehr die Vibration sich ihrem Ende nähert. So kommt es, daß der Übergang von der für ein normales Ohr eben noch übermerklichen Amplitude zu der eben schon untermerklichen eine gewisse Weile dauert. Wenn nun schon im Anfang dieser Zeitspanne der Ton für erloschen erklärt wird und das Wiederaufsetzen des Gabelstieles vor dem Ablauf derselben erfolgt, so ist es, zumal bei maximaler Anstrengung der Aufmerksamkeit, begreiflich, daß die Empfindung wieder auftritt. Man braucht darum nicht gleich an Ermüdung und Erholung des Nerven zu denken. Ob und inwieweit diese beiden Faktoren etwa bei pathologischen Zuständen in Betracht kommen, muß hier dahingestellt bleiben.

Wie rasch manche Autoren bereit gewesen sind, in Ermangelung anderer Erklärungen die Ermüdung des Gehörs heranzuziehen, dafür ist auch Dove [1]) ein Beispiel. Er brachte von zwei unisonen Gabeln die eine vor das rechte, die andere vor das linke Ohr und drehte die letztere um ihre Achse, wobei der Ton bekanntlich abwechselnd an Stärke zu- und abnimmt. Das Resultat war nicht bloß ein An- und Abschwellen der Empfindung, sondern der Ton wurde auch alternierend auf der einen und auf der anderen Seite gehört. Dove meinte, daß es sich hierbei um ein Überwiegen des intermittierenden Tones infolge einer gewissen Ermüdung des kontinuierlich gereizten Ohres handle. Die richtige Auslegung ist aber die, daß die gedrehte Gabel zufällig die lautere war und ein diotisch gehörter Ton stets auf die Seite des gerade stärker erregten Ohres verlegt wird. Richtet man den Versuch so ein, daß die rotierende Gabel die leisere ist, so bleibt der schwebende Ton dauernd auf der Seite der ruhenden Gabel.

Rayleigh [2]) fand, daß sein Ohr gegen Töne, die der oberen Hörgrenze nahe kamen, bald ermüdete. Der anfangs laute Ton verschwand nach fünf Sekunden, kehrte aber wieder, wenn das Ohr nur einen Moment mit der Hand verdeckt ward. Ich kann diese Angabe nicht bestätigen. Die, freilich nicht unerträglich lauten, sehr hohen Töne der Galtonpfeife bleiben für mich während der ganzen Beobachtungsdauer deutlich. Allerdings bemerke ich dabei unregelmäßige Intensitätsschwankungen und auch einen gelegentlichen Wechsel der Lokalisation, insofern der Ton manchmal rechts, manchmal links erscheint oder auch durch den Kopf zieht. Ich glaube aber hierfür Druckschwankungen des anblasenden Luftstromes in erster Linie verantwortlich machen zu sollen. Selbst wenn dieselben nur gering sind, können sie schon gewisse qualitative und quantitative Veränderungen der Galtontöne hervorrufen, von denen die ersteren mit einem Lagewechsel der im Beobachtungsraume sich bildenden Knoten und Bäuche verknüpft sind, was eben das Urteil über Richtung und Entfernung der Schallquelle beeinflußt. Auch Scripture

[1]) Pogg. Ann. **101**, 492, 1857 u. **107**, 652, 1859. — [2]) Nature **56**, 285.

und Smith[1]) vermochten sich nicht davon zu überzeugen, daß Ermüdungszustände bei der Beobachtung höchster Töne eine Rolle spielen.

Existieren somit keine durchschlagenden Argumente für die Ermüdbarkeit des Hörnerven einschließlich seiner Endausbreitung durch anhaltende Reize von geringer oder mäßiger Stärke, so liegt andererseits eine Reihe von Mitteilungen vor, welche darin übereinstimmen, daß die Einwirkung eines sehr intensiven Tones zu einer Art Betäubung des Ohres führt. Dieselbe äußert sich in einer Herabsetzung der Hörschärfe für den betreffenden Ton, aber auch nur für diesen, nicht zugleich für andere oder gar alle, was ausdrücklich festgestellt ist und betont zu werden verdient als ein neuer Beweis für die Selbständigkeit, welche den einzelnen Tönen in unserem Gehör eigen ist. Silvanus P. Thompson[2]) fand nach langem Anhören eines sehr lauten Tones, daß das Ohr ermüdete und die Stärke der Empfindung nachließ. Auch wurde derselbe Ton, wenn er gleich nach der Abstumpfung des Ohres schwach angegeben ward, falsch lokalisiert, nämlich zu weit nach der Seite des unermüdeten Ohres. Zu ganz ähnlichen Resultaten ist auch Urbantschitsch[3]) bei einer systematischen Untersuchung des Gegenstandes gelangt. Sein Verfahren war das folgende. Ein starker Stimmgabelton wurde durch einen Schlauch dem einen Ohre 10 bis 15 Sekunden lang zugeleitet und hierauf rasch abgedämpft. Nach dem völligen Verklungensein der Empfindung ward die Gabel vor das andere Ohr gebracht, welches den Ton dann regelmäßig noch mehrere Sekunden hörte. Dabei ist stets darauf geachtet worden, daß nicht etwa eine von vornherein bestehende ungleiche Perzeptionsfähigkeit der Ohren für den betreffenden Ton das Ergebnis fälschte. Hinsichtlich der Dauer der Ermüdung zeigte sich, daß das erschöpfte Ohr nach einigen, meist 2 bis 5, Sekunden sich wieder erholt und dann ebenso fein empfindet wie das nicht überreizte. Bei diotischer Zuleitung eines Tones pflegen viele denselben median im Kopfe zu lokalisieren. Wurde bei solchen Versuchspersonen das eine Ohr vorher in der oben beschriebenen Weise ermüdet, so erschien der Ton im Anfang der binauralen Wahrnehmung auf der Seite des unermüdeten Ohres, um erst allmählich mit zunehmender Erholung des anderen ins Innere des Kopfes zu rücken. Schließlich mag noch erwähnt werden, daß auch Jacobson[4]) bei seinen Patienten für einen und denselben Ton eine geringere Hördauer nach sehr starkem als nach schwachem Anschlag der als Tonquelle dienenden Gabel fand.

II. Von der Klangwahrnehmung.

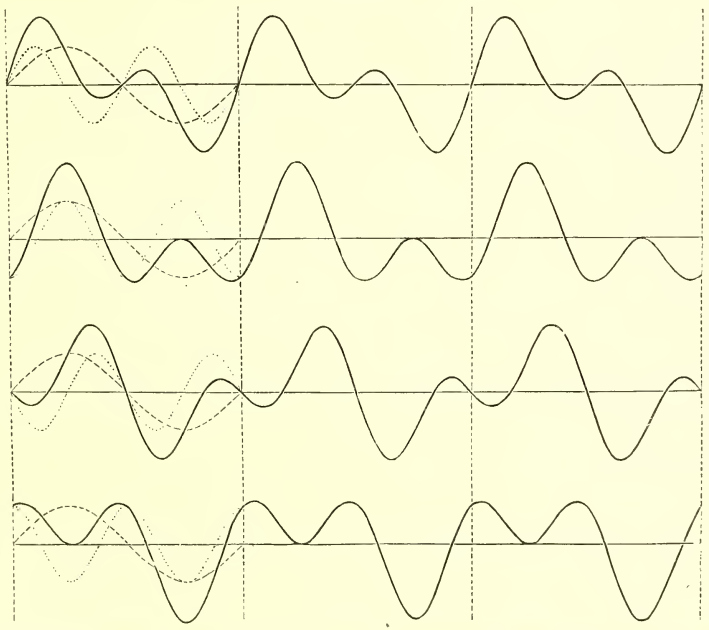
a) Die mathematische und graphische Klangzusammensetzung und -zerlegung.

Der Ton, oder, wie man im Gegensatz zum Klange, der eine Mehrheit gleichzeitiger Töne ist, auch sagt, der einfache Ton ist physikalisch betrachtet ein Schwingungsvorgang, bei welchem jeder Massenpunkt pendelförmig um seine Gleichgewichtslage oszilliert. Ist n die Anzahl der Schwin-

[1]) Stud. from the Yale Psychol. Lab. 2, 112, 1894. — [2]) Philos. Mag. (5), 12, 354 f., 1881. — [3]) Pflügers Arch. 24, 574, 1881. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. 19, 45, 1883.

gungen in der Sekunde und a die Amplitude, so ist zu der beliebigen Zeit t nach dem Beginn der Vibration der Abstand von der Gleichgewichtslage $y = a \cdot \sin 2\pi n t$ [1]). Die Art, wie y sich mit wachsendem t periodisch ändert, kann man in der Weise anschaulich machen, daß man eine schwingende Stimmgabel mittels eines an einem Zinkenende befestigten Schreibstiftes ihre Bewegungsform auf einem unter ihr gleichmäßig vorrückenden Streifen berußten Papieres aufzeichnen läßt. Man kann aber eine entsprechende Kurve, die mit Rücksicht auf obige Gleichung eine Sinuskurve genannt wird, auch ohne jedes physikalische Hilfsmittel rein zeichnerisch konstruieren. Man teilt eine Gerade, welche die Wellenlänge einer Schwingung repräsentiert, in beliebig viele, sagen wir 12, gleiche Teile, errichtet im Endpunkt des ersten Teiles eine Ordinate $y_1 = a \cdot \sin 2\pi \cdot \frac{1}{12}$, im Endpunkt des zweiten eine Ordinate $y_2 = a \cdot \sin 2\pi \cdot \frac{2}{12}$ usw. und verbindet schließlich alle Ordinatenköpfe durch eine Linie, welche eben die gesuchte Sinuskurve ist, wie etwa die gestrichelte Welle in der nachstehenden Fig. 94.

Fig. 94.



Die graphische Darstellung eines Klanges geschieht folgendermaßen. Nehmen wir z. B. an, wir hätten es mit einem solchen zu tun, der sich aus zwei Tönen zusammensetzt, und die Schwingungszahlen dieser Töne ständen im Verhältnis 4 : 5. Man macht dann eine horizontale Gerade gleich der

[1]) Diese Definition des Tones ist nicht erst, wie man öfter angegeben findet, von G. S. Ohm aufgestellt, sondern schon viel älter. Vgl. Ohms Streit mit Seebeck, welcher die Ansicht vertrat, daß auch die Obertöne zur Empfindung des Grundtones beitrügen, in Pogg. Ann. 53 (1841), 59 (1843), 60 (1843), 62 (1844), 63 (1844).

angenommenen Länge der Klangwelle (Klangperiode) und beschreibt über ihr als Abszisse erst vier aufeinanderfolgende Sinuswellen entsprechend dem tieferen Tone und darauf die fünf Sinuswellen des höheren. Alsdann wird für jeden Punkt der Abszisse die algebraische Summe der in ihm zusammenfallenden beiden Tonordinaten aufgesucht und als Lot aufgetragen. Die durch die freien Endpunkte aller dieser Lote gezogene krumme Linie ist die Klangkurve. Dieselbe wird demnach durch eine algebraische Addition, durch Superposition der Tonkurven gewonnen.

Bei dieser Konstruktion ist nun vorausgesetzt, daß einerseits die Anfangspunkte der beiden Tonschwingungen, andererseits der Endpunkt der vierten Welle des tieferen und der der fünften des höheren Tones zusammenfallen, daß also Phasengleichheit besteht. Dies ist aber ein spezieller Fall und der allgemeinere der, daß ein Phasenunterschied, eine Phasenverschiebung stattfindet, indem der eine Ton um irgend einen Bruchteil einer Schwingungsdauer früher oder später einsetzt als der andere. Fig. 94 zeigt die Komposition zweier Töne gleicher Amplitude, deren Schwingungszahlen sich verhalten wie 1 : 2, für die Gangunterschiede 0, $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$ der Länge der kürzeren Welle dargestellt. Für die Zusammensetzung ist immer das Prinzip der Superposition in gleicher Weise maßgebend. Man sieht aber, daß die resultierende Wellenform sehr von der Phasendifferenz abhängig ist, und wenn man bedenkt, daß außerdem die Anzahl der Partialtöne eines Klanges und die Wahl der einzelnen Amplituden beliebig ist, so wird verständlich, daß unendlich viele verschiedene Klangkurven möglich sind.

Der Mathematiker Fourier[1]) hat nun gezeigt, daß jede Kurve von der Abszissenlänge l, welche Gestalt sie auch im übrigen haben möge, in einer ganz bestimmten und nur in dieser einzigen Weise zerlegbar ist in eine Reihe von Sinuskurven, deren Wellenlängen gleich l, $^1/_2 l$, $^1/_3 l$ usw. sind und deren Amplituden und Gangunterschiede sich von Fall zu Fall nach der Methode der unbestimmten Koeffizienten berechnen lassen (wobei einzelne dieser Größen natürlich auch gleich Null sein können). Wie man also jederzeit aus einer gegebenen Anzahl einfacher Teiltöne auf dem Papier eine Klangwelle zu bilden vermag, so ist man mittels der Fourierschen Analyse, auf deren Einzelheiten hier nicht eingegangen werden soll, auch imstande, aus der gegebenen Klangwelle deren Komponenten wieder zu ermitteln.

b) Die physikalische Klangzerlegung.

Das Theorem von Fourier ist für verschiedene physikalische Probleme von Wichtigkeit, und gerade für die Akustik hat es nicht etwa bloß die Bedeutung einer mathematischen Fiktion, sondern einen sehr wesentlichen reellen Sinn. In einem unser Ohr treffenden Klangwellenzuge sind nämlich faktisch alle diejenigen Teiltöne und nur diese als pendelförmige Komponenten enthalten, welche auch die mathematische Analyse ergibt. Man kann sich hiervon unter Benutzung diverser physikalischer Hilfsmittel überzeugen, bei denen die Erscheinung des Mitschwingens oder der Resonanz zur Wirkung kommt. Man hebe etwa die Dämpfung eines Klaviers auf und singe mit kräftiger Stimme auf eine nicht zu hohe Note einen Vokal gegen das Instrument, so

[1]) Théorie analytique de la chaleur, Paris 1822.

gibt dasselbe ihn deutlich zurück. Der von dem Sänger erzeugte Klang, denn ein solcher ist ein Vokal in jedem Falle, wird von dem Saitensystem des Klaviers in seine Teiltöne zerlegt, indem jede Saite durch die ihrer Schwingungszahl entsprechende pendelförmige Komponente der Klangwelle in Mitschwingungen versetzt wird, und da die Saiten ihre Töne wieder auf die Luft übertragen, so entsteht aus der Kombination der Vokalklang aufs neue. Auch Stimmgabeln auf Resonanzkasten werden durch gleichgestimmte Töne zu hörbarem Schwingen gebracht und können noch eine ganze Weile nach dem Erlöschen des erregenden Tones nachklingen. Der Nutzen der Resonanzkasten ist ebenfalls auf das Prinzip des Mittönens zurückzuführen, insofern abgegrenzte Lufträume je nach ihrer Größe durch die Einwirkung gewisser Töne in Schwingungen von fast reiner Pendelform geraten und damit jene Töne verstärken. Helmholtz konstruierte cylindrische oder konische Röhren und Hohlkugeln [1]), die mit einer äußeren Mündung und einer zweiten zur Einführung in den Gehörgang bestimmten Öffnung versehen waren und die, unter dem Namen Resonatoren bekannt, seither dem Fortschritte der Akustik die wesentlichsten Dienste geleistet haben. Jeder solche Resonator hat eine Reihe von Eigentönen, von denen der tiefste ganz besonders intensiv mit einem in seiner Nähe hervorgebrachten Tone von gleicher Höhe mitklingt. Verschließt man das eine Ohr und steckt in das andere einen Helmholtzschen Resonator, so hört man die meisten in der Umgebung vorhandenen Töne sehr gedämpft. Sobald aber der Grundton des Resonators angegeben wird, dringt er mit großer Stärke ins Ohr. Es läßt sich übrigens auch, ohne daß das Gehör zu Hilfe genommen wird, die Zusammensetzung eines Klanges aus seinen Teiltönen physikalisch demonstrieren. So kann man die eine Öffnung eines Resonanzraumes mit einer Membran überspannen und deren Mitschwingen mit einem von außen kommenden Tone durch aufgestreuten Sand, der in Bewegung gerät, sichtbar machen. Oder man verbindet einen Resonator mit einer manometrischen Kapsel nach R. Koenig [2]), zündet deren Gasbrenner an und beobachtet in einem rotierenden Planspiegel das Bild der Flamme, die im Tempo der Verdichtungen und Verdünnungen der Luft im Resonator auf und nieder zuckt.

c) Die physiologische Klangzerlegung.

Für die ganz tiefen Töne pflegt man keine Resonatoren zu verfertigen, da sie wegen ihrer gewaltigen Dimensionen allzu unhandlich wären. Andererseits reichen die Resonatoren infolge der raschen Verkleinerung ihrer Maße mit wachsender Tonhöhe nur etwa bis zur fünfgestrichenen Oktave. Innerhalb dieser Grenzen kann man aber mittels der Resonatoren alle Klänge in ihre sämtlichen Teiltöne, sofern deren Intensität nicht exzessiv gering ist, zerlegen. Streng theoretisch genommen, bedarf man indessen überhaupt keines Apparates zum Zwecke der Klanganalyse, da das normale Ohr befähigt ist, dieselbe selbständig auszuführen, eine Tatsache, die zu den wichtigsten der physiologischen Akustik gehört. Die praktische Beobachtung lehrt freilich, daß nicht jedes Ohr jeden beliebigen Klang vollständig in seine Partial-

[1]) Lehre von den Tonempfindungen (5), S. 73. — [2]) Vgl. R. Koenig, Quelques expériences d'acoustique, 7, 47 ff., Paris 1882.

töne aufzulösen vermag, aber wo es mißlingt, handelt es sich entweder seitens des Beobachters um einen Mangel an Fähigkeit bzw. Übung, die physiologisch getrennten Empfindungen auch im Bewußtsein auseinander zu halten, oder um besondere in der Aufgabe liegende Schwierigkeiten. Manche Klänge sind bequem zu analysieren, wie beispielsweise ein Zweiklang, der aus einem sehr tiefen und einem sehr hohen einfachen Ton besteht, andere schwer. In letzterer Hinsicht kommt zunächst in Betracht, daß die lauteren Teiltöne sich meistens der Aufmerksamkeit mehr aufdrängen als die leiseren, falls diese nicht etwa völlig unterdrückt werden. Zweitens macht das Schwingungsverhältnis gleichzeitiger Töne einen wesentlichen Unterschied für das Heraushören aus einem Klange. Nach Stumpf geht der Grad der „Verschmelzung" zweier Töne dem Grade ihrer Konsonanz parallel. Demgemäß sind Partialtöne, die im Oktaven- oder Quintenverhältnis stehen, nicht so leicht voneinander zu trennen wie die dissonanten selbst bei größerer Stärke. Endlich verdient noch hervorgehoben zu werden, daß das Gehör bei der Klangzerlegung versagt, wo die Höhendifferenz der Teiltöne unter eine gewisse Grenze sinkt. Die Unterschiedsempfindlichkeit für zwei gleichzeitige Töne ist durchweg erheblich weniger entwickelt als diejenige für aufeinanderfolgende. Im Anschluß an vereinzelte Angaben früherer Autoren habe ich mit A. Guttmann[1]) diesen Gegenstand einer eingehenderen Prüfung unterzogen, welche die Tonregion zwischen G_1 und d^3 betraf. Es ergab sich für bestens geübte, mit Tönen in jeder Beziehung vertraute Beobachter, daß im mittleren Teile der musikalischen Skala zwei Töne nur dann als zwei und nicht mehr als ein einziger aufgefaßt werden, wenn ihr Abstand mehr als 10 bis 20 Schwingungen beträgt. In der eingestrichenen Oktave scheint die Unterschiedsempfindlichkeit am größten zu sein. Nach der Tiefe zu findet jedenfalls ein deutliches Steigen der Schwelle statt, und in der zweigestrichenen Oktave zeigt die Unterschiedsempfindlichkeit wenigstens eine gewisse Tendenz zur Abnahme. Jenseits des d^3 muß diese sich dann rasch vergrößern, denn Stimmgabelzweiklänge aus der oberen Hälfte der vier- und dem Anfange der fünfgestrichenen Oktave, wie 3200 + 3840, 3840 + 4000, 4000 + 4800 und ähnliche, erscheinen durchaus als ein Ton. Detaillierte Beobachtungen bezüglich dieser höheren und der ganz hohen Töne fehlen indessen noch. Unsere Versuche wurden mit möglichst obertonfreien Klangquellen angestellt. Experimentiert man mit tiefen Zungentönen, so erweist sich die Unterschiedsempfindlichkeit als größer, weil offenbar die Unterscheidung der beiderseitigen benachbarten höheren Obertöne die Beurteilung erleichtert.

d) Die Klangfarbe.

Durch die physiologische Klangzerlegung, eventuell unter Zuhilfenahme von Resonatoren, kann sich jeder ohne große Mühe davon überzeugen, daß der sog. „Ton", welchen man hört, wenn eine Stimmgabel oder eine Klaviersaite angeschlagen, eine Violinsaite gestrichen oder eine Taste des Harmoniums niedergedrückt wird, kein einfacher Ton, sondern ein Klang ist. Es gibt meines Wissens zurzeit überhaupt kein musikalisches Instrument, das

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **32**, 87, 1903.

imstande wäre, Wellen von reiner Pendelform auszusenden; immer wird ein mehr oder weniger zusammengesetzter Klang produziert.

Ein solcher Klang besteht nun aus dem Grundtone, welcher der tiefste sowie meist der lauteste Teilton ist, weshalb er auch zur Bezeichnung der Tonhöhe des Ganzen benutzt wird, und dessen Obertönen. Letztere zerfallen in harmonische und unharmonische, von denen uns hier nur die erstgenannten interessieren. Dieselben haben die Eigenschaft, daß ihre Schwingungszahlen Vielfache von der Schwingungszahl des Grundtones sind, und zwar derart, daß der erste Oberton oder zweite Partialton die Schwingungszahl $2n$ hat, wenn n die Schwingungszahl des Grundtones ist, der zweite Oberton oder dritte Partialton die Schwingungszahl $3n$ und so fort. Der erste Oberton ist also die Oktave des Grundtones, der zweite die Duodezime, der dritte die Doppeloktave, der vierte die zu dieser gehörige Durterz usw. Bei den Zungenpfeifen ist die Reihe der Obertöne relativ sehr lang, bei den Klängen der Stimmgabeln, der angeblasenen Flaschen und der weiten gedackten Pfeifen nur kurz. Bei den meisten Instrumenten folgen die Obertöne lückenlos nach der Ordnungszahl aufeinander, in anderen Fällen dagegen enthält der Klang nur die ungeradzahligen Teiltöne.

So ist die Zahl, die Reihenfolge und auch die Stärke, in welcher die Obertöne den Grundton begleiten, bei den verschiedenen Tonmitteln verschieden. Jede Klangquelle hat in dieser Beziehung ihre spezifische Eigentümlichkeit, und gerade hierauf sind von Helmholtz die Unterschiede der Klangfarben zurückgeführt worden. Er hat die Klänge der wichtigsten Instrumente hinsichtlich ihrer Zusammensetzung eingehend untersucht und aus seinen Resultaten die folgenden Regeln [1]) als im allgemeinen gültig abgeleitet.

1. Einfache Töne — nach unseren heutigen Kenntnissen würden wir richtiger sagen: möglichst obertonfreie Klänge — wie die der Stimmgabeln mit Resonanzröhren und der weiten gedackten Orgelpfeifen, klingen sehr weich. Sie sind ohne alle Rauhigkeit, aber unkräftig und, wenn sie tief sind, dumpf.

2. Klänge, welche von einer Reihe ihrer niederen Obertöne bis etwa zum sechsten in mäßiger Stärke begleitet werden, sind klangvoller, musikalischer, reicher, prächtiger, aber durchaus wohllautend und weich. Hierher gehören die Klänge des Klaviers und der offenen Orgelpfeifen sowie die weicheren Pianotöne der menschlichen Stimme und des Horns, welche letzteren den Übergang zu den Klängen mit hohen Obertönen bilden, während die Flöten sich den einfachen Tönen nähern.

3. Wenn nur die ungeradzahligen Obertöne vorhanden sind, wie bei den engen, gedackten Orgelpfeifen, den in der Mitte angeschlagenen Klaviersaiten und der Klarinette, so bekommt der Klang einen hohlen oder bei einer größeren Zahl von Obertönen einen näselnden Charakter. Überwiegt der Grundton an Stärke, so ist der Klang voll; leer dagegen, wenn jener an Stärke den Obertönen nicht hinreichend überlegen ist. So ist der Klang weiter, offener Orgelpfeifen voller als derjenige von engeren, der Klang der Saiten voller, wenn sie mit Klavierhämmern angeschlagen, als wenn sie gerissen werden,

[1]) Lehre v. d. Tonempf. (5), S. 192.

der Ton der Zungenpfeifen mit passendem Aufsatz voller als ohne einen solchen.

4. Wenn die höheren Obertöne jenseits des sechsten oder siebenten sehr deutlich sind, so wird der Klang rauh und scharf. Der Grad der Schärfe kann verschieden sein; bei geringerer Stärke beeinträchtigen die hohen Obertöne die musikalische Brauchbarkeit nicht wesentlich, sind im Gegenteil günstig für die Charakteristik und Ausdrucksfähigkeit der Musik. Von dieser Art sind besonders wichtig die Klänge der Streichinstrumente, ferner die meisten Zungenpfeifen, Oboe, Fagott, Harmonium und menschliche Stimme. Die rauheren, schmetternden Klänge der Blechinstrumente sind außerordentlich durchdringend und machen deshalb mehr den Eindruck großer Kraft als ähnliche Klänge von weicherer Klangfarbe, weshalb sie zwar an sich weniger zur künstlerischen Musik geeignet, aber sehr wirkungsvoll im Orchester sind.

Den klassischen Untersuchungen von Helmholtz verdanken wir somit die Einsicht in die physikalischen Bedingungen für die Unterschiede der Klangfarben. Wir sind jetzt imstande, schon aus der mathematischen Zerlegung einer Klangkurve mit ziemlicher Sicherheit zu ersehen, ob wir es mit einem weichen oder scharfen, einem vollen oder hohlen Klange zu tun haben würden, falls das Ohr ihn vernähme. Warum aber eine bestimmte Art der Zusammensetzung dem Klange gerade den Charakter des Vollen, eine andere den des Leeren verleiht, warum allein der Mangel der geradzahligen Teiltöne einen näselnden Eindruck hervorruft: diese und ähnliche Fragen sind von Helmholtz nicht in den Kreis seiner Betrachtungen gezogen worden. Dagegen hat Stumpf[1]) die Wichtigkeit der hier sich darbietenden psychologischen Probleme hervorgehoben und dieselben einer gründlichen Erörterung unterzogen.

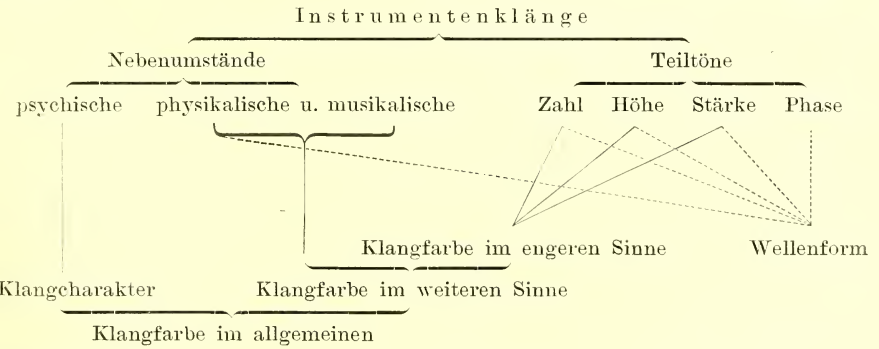
Die zur Bezeichnung von Klangfarben üblichen Ausdrücke sind sehr zahlreich und mannigfaltig. Man spricht von milden, weichen, schmelzenden, von harten und rauhen Klängen, von vollen, breiten, dicken, spitzen, dünnen und leeren. Man unterscheidet glänzende, markige, dröhnende, prächtige, feurige, majestätische Klänge von trüben, hölzernen, trockenen, düsteren, idyllischen usw. Vielfach handelt es sich bei derartigen Benennungen um assoziierte Vorstellungen und Gefühle, und alles hierher Gehörige trennt Stumpf unter dem zusammenfassenden Begriff des Klangcharakters von der eigentlichen Klangfarbe ab. Die letztere kann man dann wieder in einem engeren und im weiteren Sinne auffassen. Was Stumpf unter der Klangfarbe im engeren Sinne versteht, deckt sich mit dem, was Helmholtz die musikalische Klangfarbe nannte und auf die Zusammensetzung des Klanges aus Teiltönen zurückführte. Die Klangfarbe im weiteren Sinne umfaßt nach Stumpf außer der Klangfarbe im engeren Sinne noch eine Reihe charakteristischer Merkmale der Instrumente, die auch Helmholtz bereits annähernd vollständig angegeben hat, nämlich die spezifische Art und Dauer des An- und Ausklingens, die begleitenden blasenden, zischenden, sausenden, kratzenden Geräusche, welche sehr wesentlich zur Erkennung der Instrumente beitragen, gewisse eigentümliche Unterschiede der

[1]) Tonpsychologie 2, 514 bis 549, 1890.

Höhenlage und Klangstärke, Höhe- und Stärkeschwankungen und endlich besondere melodische, rhythmische, auch wohl harmonische oder modulatorische Wendungen. Was die Klangfarbe im engeren Sinne betrifft, so greift Stumpf zum Zweck der psychologischen Erklärung auf die Tonfarben zurück. Der Klang besteht aus Teiltönen; jeder Teilton hat seine eigene Tonfarbe, und der Komplex aller dieser Tonfarben macht eben das aus, was wir die Klangfarbe zu nennen pflegen. Erinnern wir uns hier des früher über die Tonfarben Mitgeteilten, so begreift sich die erste Helmholtzsche Regel ohne weiteres; nur ist hinzuzufügen, daß sie für die einfachen Töne der höchsten Oktaven nicht gilt und überhaupt die Farbe einfacher Töne sich mit der Höhe stetig ändert. Bezüglich der übrigen Regeln ist sofort klar, daß durch Hinzufügung immer zahlreicherer Obertöne ein Klang immer kräftiger, markiger und mit zunehmender Höhe der Teiltöne immer heller werden muß. Je stärker ferner der Grundton und je tiefer seine Lage, um so mehr wird er dem Klange eine gewisse Breite und Fülle verleihen. Hohe Grundtöne mit ihren noch höheren Obertönen müssen dagegen immer helle und spitze Klänge geben bzw. bei genügender Stärke einen gellenden Eindruck machen, weil eben jeder einzelne Teilton schon an sich in dieser Richtung wirkt.

Wird von verschiedenen Instrumenten ein und derselbe Grundton produziert und ist er so hoch, daß sämtliche oder die meisten Obertöne über die obere Hörgrenze hinaus fallen oder ihr wenigstens nahe kommen, so ist zu erwarten, daß die Klangfarbenunterschiede verschwinden, weil die Differenzen in den Verhältnissen der Partialtöne sich unter diesen Umständen ausgleichen. In der Tat hat Preyer[1]) gefunden, daß von vielen guten Beobachtern keiner imstande war, die Zungentöne c^4 und c^5 von den gleichen Gabeltönen zu unterscheiden, solange die Stärke nicht sehr bedeutend war. Wurde aber das c^4 mit großer Intensität angegeben, so war der Unterschied eben merklich; offenbar weil dann der zweite Teilton bei der Zunge deutlicher wurde als bei der Gabel.

Im Anschlusse an Stumpfs psychologische Zergliederung des so komplizierten Begriffes der Klangfarbe, die auf lange Zeit hinaus maßgebend bleiben wird, können wir uns den Zusammenhang der hier in Betracht kommenden Dinge durch ein einfaches Schema, wie folgt, übersichtlich machen.



[1]) Akustische Untersuchungen, Jena 1879, S. 21.

Im ganzen wird keine weitere Erläuterung nötig sein. Nur auf einen Punkt ist besonders aufmerksam zu machen, nämlich auf den Umstand, daß keine Beziehung zwischen der Klangfarbe und den Phasenverhältnissen der Teiltöne besteht, während letztere ja die Wellenform des Klanges sehr wesentlich beeinflussen.

Die Abhängigkeit der Klangwellenform von den Phasenverhältnissen ist nur eine Folge der algebraischen Summierung der Partialtonwellen. Diese wird aber bei der Klangzerlegung durch das Gehör, wie ja die Beobachtung lehrt, wieder rückgängig gemacht, und die Teiltöne fließen selbständig nebeneinander her. Damit hört die gegenseitige Beeinflussung hinsichtlich der Phasen auf, und da es auch für die Empfindung des einzelnen einfachen Tones irrelevant ist, ob zuerst eine Verdichtung oder eine Verdünnung der Luft das Trommelfell trifft, so drängt sich a priori der Schluß auf, daß der Klangeindruck schlechthin unabhängig von den Phasenverhältnissen ist und daß Klänge von verschiedener Wellenform, sofern diese Verschiedenheit nur auf Phasenverschiebungen beruht, identische Wahrnehmungen ergeben.

Helmholtz[1]) hat indessen noch einen besonderen experimentellen Beweis hierfür beigebracht, wohl hauptsächlich mit Rücksicht auf die entscheidende Bedeutung des Gegenstandes für seine später zu erörternde Theorie des Hörens. Er kombinierte zum Zweck der Zusammensetzung von Klängen aus möglichst einfachen Tönen eine Anzahl elektrisch angetriebener Stimmgabeln mit verschließbaren Resonanzröhren. Waren alle Gabeln in Gang und alle Röhren geschlossen, so ließ sich höchstens ein leises Summen vernehmen; wurden aber diese oder jene Resonatoren geöffnet, so konnte man dadurch Klänge von verschiedener Färbung hervorbringen. Helmholtz benutzte den Apparat in erster Linie zur Synthese künstlicher Vokale. Er überzeugte sich aber mit Hilfe desselben auch davon, daß es für die Klangfarbe gleichgültig war, ob man eine bestimmte Schwächung einzelner Teiltöne durch Entfernung der Resonanzröhren oder durch entsprechenden Verschluß derselben bewirkte. In ersterem Falle fand nur eine Intensitätsverminderung, im zweiten zugleich eine Phasenverschiebung statt, die mithin zur Klangveränderung nicht merklich beitrug. Hiergegen ist, vielleicht nicht ganz mit Unrecht, eingewendet, daß mit der Verengerung der Resonatormündung eine kleine Tonhöhenverstimmung eintritt und daß, wenn diese nicht als Änderung der Klangfarbe empfunden wurde, auch ein Einfluß der Phasenverschiebung überhört sein könne, zumal ja zwischen je zwei Beobachtungen wegen der Umstellungen einige Zeit verging. Es war darum sehr erwünscht, daß Hermann[2]) Versuche gleicher Tendenz auf ganz andere Weise anstellte. Er bediente sich des Edisonschen Phonographen und ließ mit Vokalen oder Musikstücken bedeckte Cylinder mit gleicher Geschwindigkeit wie bei der Aufnahme, aber in entgegengesetzter Richtung rotieren, wodurch die zeitliche Folge des akustischen Vorganges sich umkehrte und die Phasen „vollständig durcheinandergeworfen wurden". Die Klangfarbe erwies sich trotzdem als absolut unverändert. Außer diesem Abszissenumkehrungsversuch wurde auch noch eine Ordinatenumkehrungsprobe gemacht, die das gleiche Resultat

[1]) Lehre von den Tonempfindungen (5), S. 194 ff. — [2]) Pflügers Arch. 56, 467, 1894.

hatte. Hieraus und aus einigen anderen Beobachtungen folgert Hermann mit der größten Bestimmtheit, daß die Phasenverhältnisse an sich keinen Einfluß auf das Gehör haben, ein Schluß, den neuerdings Lindig[1]) vollkommen bestätigt hat. Dieser Autor arbeitete mit einer passend abgeänderten Weber-Karstenschen Telephonsirene, welche es gestattete, alle in den Klängen enthaltenen Obertöne hinsichtlich ihrer Zahl und Phase genau festzustellen, sowie die verschiedensten Intensitäts- und Phasenverhältnisse zu erzielen. Es ergab sich, daß Phasenverschiebungen nur dann Klangfarbenunterschiede zur Folge haben, wenn gewisse Obertöne, die in genügender Stärke vorhanden sein müssen, sich dabei durch Interferenz gegenseitig verstärken oder vernichten. Der Phasenwechsel bedingt also in diesen Fällen zunächst eine Intensitätsänderung von Teiltönen und diese erst die Veränderung der Klangfarbe.

Auf Interferenz ist auch die periodische Färbungsschwankung mancher schwebender Klänge zurückzuführen. Erklingen zwei nahezu gleich hohe Grundtöne zusammen, so treten immer während des Minimums der Schwebung die Obertöne relativ hervor, wobei der Klang heller wird. Bilden die Grundtöne eine verstimmte Oktave, so schwebt der höhere mit dem ersten Obertone des tieferen. Der tiefere überwiegt dann im Gesamteindruck zur Zeit des Schwebungsminimums, der Zusammenklang seiner Oktave mit dem höheren Primärton aber zur Zeit des Maximums. Im ersteren Falle erscheint der Klang etwas dumpfer, im letzteren etwas schärfer.

Die Einflußlosigkeit der Phasenverhältnisse als solcher auf die Klangfarbe ist meines Erachtens derart sichergestellt, daß es mir überflüssig erscheint, auf die dagegen geltend gemachten Einwendungen ausführlich einzugehen. Nur gewisse Versuche von R. Koenig[2]) mögen hier ihres historischen Interesses wegen erwähnt werden. Derselbe zeichnete eine Anzahl Klangkurven, die sich nur durch die Phasenverhältnisse unterschieden, schnitt sie in Blech aus, brachte die in Cylinderform über die Fläche gebogenen Blechstreifen auf eine gemeinsame rotierende Achse und blies die Kurven durch einen länglichen Spalt an. Den aus dieser Konstruktion sich ergebenden Apparat nannte er Wellensirene. Er fand die Klangfarbe der Kurven verschieden und führte dies auf die Phasenunterschiede zurück. Seine Beobachtung ist nun zwar richtig, nicht aber die Begründung. Denn nachdem schon Hermann[3]) darauf hingewiesen hatte, daß für die Zusammensetzung der beim Anblasen der Wellensirene in der Luft entstehenden Klänge nicht nur die graphische Form der Kurve, sondern auch das Richtungsverhältnis zwischen Blechkante und Spalt maßgebend sei, erbrachte Stumpf[4]) in einer Untersuchung über die Ermittelung von Obertönen den experimentellen Beweis, daß die einzelnen Klänge der Wellensirene sich in bezug auf die Intensität der Teiltöne wesentlich unterscheiden und eben dadurch die Klangfarbendifferenzen veranlaßt werden. Koenig hat seine Sirene noch in der Weise modifiziert, daß eine Reihe in Blech ausgeschnittener Sinuskurven gleichzeitig mit beliebigem Phasenverhältnis angeblasen werden konnten. Dem Phasenwechsel entsprach

[1]) Über den Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe. Dissert. Kiel 1902. — [2]) Wiedemanns Ann. **57**, 339, 1896 (woselbst auch die ältere Literatur); ferner ebenda S. 555. — [3]) Pflügers Arch. **56**, 468 ff., 1894. Vgl. auch Wiedemanns Ann. **58**, 391, 1896. — [4]) Wiedemanns Ann. **57**, 678, 1896.

dabei auch eine Klangfarbenveränderung. Dieselbe ist indessen offenbar im Sinne der von Lindig gegebenen Erklärung aufzufassen, da die sinusförmigen Blechkurven, wie Stumpf in der eben erwähnten Arbeit konstatierte, keineswegs einfache Grundtöne, sondern auch diverse Obertöne hören lassen.

III. Von den sekundären Klangerscheinungen.

Wenn zwei Töne zugleich erklingen, so treten unter geeigneten Umständen infolge ihres Zusammenwirkens außer den ihnen selbst entsprechenden Empfindungen noch andere Gehörswahrnehmungen auf. Das gleiche ist der Fall, wenn nur ein einziger Ton angegeben wird, seine Amplitude aber nicht konstant bleibt oder wie beim Verklingen stetig abnimmt, sondern periodischen Schwankungen unterliegt. Wir wollen derartige Nebenwahrnehmungen als sekundäre Klangerscheinungen und die dieselben veranlassenden Töne, wie üblich, als Primärtöne bezeichnen.

a) Die Schwebungen.

Haben zwei dem Ohre zusammen dargebotene Töne genau die gleiche Schwingungszahl, so unterscheidet sich die Gesamtempfindung von der des einzelnen Tones nur durch die je nach den Phasenverhältnissen größere oder geringere Stärke. Wird aber der eine Ton gegen den anderen verstimmt, so resultiert ein eigentümliches und sehr eindringliches Phänomen. Die Gleichmäßigkeit der Empfindung hört auf, und an ihre Stelle tritt ein rhythmischer Intensitätswechsel. Ist die Tonhöhendifferenz sehr gering, so erscheint derselbe als ein langsames An- und Abschwellen; der Ton wogt oder schwebt gleichsam auf und nieder. Daher die Bezeichnung Schwebungen, statt deren übrigens auch die Ausdrücke Schläge und Stöße benutzt werden, was darauf zurückzuführen ist, daß raschere Schwebungen eher an Hammerschläge als an eine Wellenbewegung erinnern.

Die Anzahl der Schwebungen in der Sekunde ist gleich der Schwingungszahlendifferenz der Primärtöne. Wenn man also zwei Töne zunächst genau unison stimmt und dann den einen schrittweise erhöht oder vertieft, so wächst auch die Frequenz der Schwebungen entsprechend, und es läßt sich die Veränderung studieren, welche der psychische Eindruck der Schwebungen mit zunehmender Schnelligkeit derselben erfährt. Man kann zu solchen Versuchen Stimmgabeln benutzen, in deren eine Zinke ein Stift mittels eines Schraubengewindes so eingesetzt ist, daß er einwärts oder auswärts geschroben und dadurch die Gabel erhöht oder vertieft werden kann. Oder man bedient sich eines der bekannten Appunnschen Tonmesser, die eine große Reihe von Zungen enthalten, deren Tonhöhen um je 2 oder 3 beziehungsweise 5 Schwingungen differieren. Auch Pfeifen mit verschieblichem Stempel sind zu dem in Rede stehenden Zwecke sehr nützlich[1]. Die zunächst sich erhebende Frage nach der längsten noch hörbaren Schwebung ist verschieden beantwortet worden. A. Mayer hat noch eine Schwebung von 8, Rayleigh

[1]) L. W. Stern hat kürzlich einen aus solchen kombinierten, zu vielen Beobachtungen sehr brauchbaren Apparat unter dem Namen „Tonvariator“ beschrieben (Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 30, 422, 1902).

sogar solche von 24 Sekunden Dauer wahrgenommen, und letzterer meinte, daß man noch langsamere hören könne. In der Tat fand denn auch Lindig im Verlaufe gewisser Versuche mit verstimmten Oktaven[1]), daß die Schwebungen bis zu einer Dauer von drei Minuten merklich waren.

So langsame Schwebungen noch als solche zu erkennen, ist natürlich im allgemeinen äußerst schwierig. Dagegen sind die Stöße sehr deutlich und leicht mit dem Ohre zu verfolgen, wenn etwa einer bis sechs auf die Sekunde kommen. Sie lassen sich dann ohne Mühe zählen. Steigt ihre Zahl auf 20 oder 30, so ist letzteres freilich nicht mehr möglich, aber man hat immerhin noch den Eindruck einer Folge von Tonstößen. Dabei ist jedoch der Klang wirr und rauh. Bei weiterer Zunahme der Frequenz der Schwebungen bleibt diese Rauhigkeit charakteristisch, nimmt indessen allmählich mehr und mehr ab und verschwindet schließlich gänzlich, womit dann die andere Grenze für die Wahrnehmbarkeit von Schwebungen hinsichtlich ihrer Zahl erreicht ist.

Der Charakter der Rauhigkeit richtet sich nach der Geschwindigkeit der Stöße. Langsamere Schwebungen geben eine gröbere Art von Rauhigkeit, ein Rollen, Knarren, Rasseln; raschere geben eine feinere und schärfere Rauhigkeit, ein Schwirren oder Zwitschern. Der letztere Ausdruck ist namentlich für die Stöße sehr hoher Töne bezeichnend. Helmholtz hebt in seiner Beschreibung der Schwebungen[2]) hervor, daß dieselben ganz den gleichen Eindruck machen wie ein dem Ohre mit entsprechender Frequenz intermittierend zugeleiteter Ton und bezieht die Unterschiede in der Empfindung lediglich auf die Unterschiede der Schnelligkeit. Dagegen äußert Stumpf[3]), daß ihm in den Fällen von stärkeren oder schnelleren Schwebungen noch gewisse Nebenerscheinungen hinzuzutreten schienen, nämlich hauptsächlich Geräusche, welche nach seiner Meinung nicht völlig auf Tonempfindungen oder Modifikationen solcher zurückführbar seien, dann aber auch äußerst hohe Töne, die vor allem an dem Schwirren und Zwitschern beteiligt wären. Besonders deutlich fand er dies bei der Beobachtung des von Zungen erzeugten Zweiklangs $c^2 d^2$. Es war dabei ein so unangenehmes Zwitschern in den Ohren lokalisiert[4]), wie es bei derselben Zahl der Schwebungen und beliebiger Stärke in den tieferen Regionen nicht zustande kommt. Daß die nämliche Anzahl Stöße um so rauher klingt, je höher die Lage des Tonpaares ist, hat übrigens schon Helmholtz hervorgehoben. Er macht darauf aufmerksam, daß der Halbton $h^1 c^2$, die Ganztöne $c^1 d^1$ und $d^1 e^1$, die kleine Terz eg, die große Terz ce, die Quarte Gc und die Quinte CG je 33 Schwebungen geben, daß aber diese Intervalle mit zunehmender Tiefe immer mehr und mehr von Rauhigkeit frei werden.

Die obere Frequenzgrenze für die Wahrnehmbarkeit der Schwebungen ist in den einzelnen Oktaven verschieden, und zwar kann man um so raschere Schwebungen hören, je höher die Primärtöne sind. Stumpf[5]) vermochte in der großen Oktave, wenn C als tieferer Ton genommen wurde, mit ans Ohr gehaltenen Gabeln direkte Schwebungen noch bis über die Quinte hinaus zu vernehmen. Hier liegt also die Grenze bei etwa 40

[1]) Ann. der Physik (4), **11**, 43, 1903. — [2]) Tonempfindungen (5), S. 280 ff. — [3]) Tonpsychologie **2**, 452, 1890. — [4]) Sehr starke Schwebungen erregen infolge der heftigen Bewegung des Trommelfelles geradezu Tastempfindungen im Ohre. — [5]) Tonpsychologie **2** (1890).

Stößen in der Sekunde. Ich selbst habe gelegentlich in dieser Beziehung die kleine und die eingestrichene Oktave einer von Ton zu Ton fortschreitenden Prüfung unterworfen, wobei ich Edelmannsche Gabeln benutzte. Ich fand in der ersteren durchschnittlich etwa 60, in der letzteren 100 bis 130 Schwebungen noch eben als Rauhigkeit merklich. Die Terzen $c^3\,e^3$ und $e^3\,g^3$, die beide 264 Schwebungen geben, sind noch deutlich rauh und ebenso nach der Angabe von Stumpf die Intervalle $f^4\,g^4$, $g^4\,a^4$, $e^5\,f^5$ mit 341 sowie $a^4\,h^4$ mit 427 Schwebungen; $h^5\,c^6$ mit der Differenz 512 und $f^5\,g^5$ mit dem Schwingungszahlenunterschied 683 sind durchaus glatt. Je höher also die Tonregion, um so größer das Maximum hörbarer Stöße, um so kleiner aber andererseits das Intervall, welches eben noch rauh klingt: in der großen Oktave ist es ungefähr die übermäßige Quinte, in der eingestrichenen der Tritonus, in der dreigestrichenen die große Terz, in der viergestrichenen die große Sekunde und in der fünfgestrichenen die kleine Sekunde.

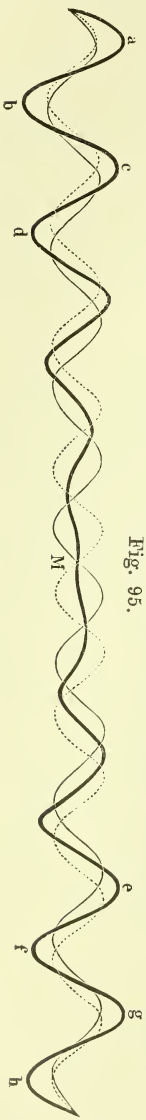


Fig. 95.

Haben zwei schwebende Primärtöne hinreichend kräftige Obertöne, so hört man auch deren Schwebungen. Das erste Obertonpaar gibt doppelt so viel Stöße wie die beiden Grundtöne, das zweite Obertonpaar dreimal so viel und so fort. Auch die Obertöne eines einzigen Grundtones können zusammen Schwebungen erzeugen, welche dann dem Klange eine größere oder geringere Rauhigkeit und Schärfe verleihen. Als Beispiel sei nur das C des Harmoniums erwähnt, bei dem die Teiltöne vom siebten (b^1) aufwärts einander genügend nahe liegen und stark genug sind, um merklich zu schweben.

Soviel von den Empfindungstatsachen. Betrachten wir nun noch kurz die physikalischen Verhältnisse und nehmen wir, um ein leicht übersichtliches Paradigma zu wählen, an, zwei Töne, von denen der eine 200, der andere 201 Schwingungen mache, begännen in gleicher Phase mit einer Verdichtung. Dann ist infolge der Addition dieser beiden Verdichtungen die Amplitude der Klangwelle im Anfang relativ beträchtlich. Nach einer halben Sekunde aber hat der tiefere Ton eben eine ganze, nämlich die hundertste, der höhere eine halbe Schwingung absolviert, und beide befinden sich in entgegengesetzten Phasen, so daß sie einander schwächen. Die Klangamplitude ist also nach einer halben Sekunde auf ein relatives Minimum gesunken, steigt dann indessen bis zum Ende der ganzen Sekunde, zu welcher Zeit beide Töne wieder gleiche Phasen bekommen, abermals zum Maximum an. Somit erfährt der Klang ein einmaliges Ab- und Anschwellen seiner Stärke in jeder Sekunde, es findet eine Schwebung pro Sekunde statt[1]). Die vorstehende Figur, die die Sinuswellen und die Klangwelle zweier Töne vom Schwingungszahlenverhältnis 8 : 9 darstellt, möge die Form einer

[1]) Diese Deduktion läßt zugleich erkennen, warum die Zahl der Schwebungen mit der Differenz der Schwingungszahlen der Primärtöne übereinstimmt.

„Schwebungskurve“ veranschaulichen. Die Buchstaben a bis h kennzeichnen das Maximum, M das Minimum der Schwebung.

Die Betrachtung einer solchen Kurve könnte einen mit der Physiologie des Hörens weniger Vertrauten auf die Vermutung bringen, die Wahrnehmung der Schwebungen käme in der Weise zustande, daß eben das Ansteigen der physikalischen Klangamplitude unmittelbar als Zunahme, das Absinken als Abnahme der Stärke empfunden würde. Allein so einfach liegt die Sache in Wirklichkeit nicht. Es darf nicht übersehen werden, daß beim Hören eine Auflösung des Klanges in seine Teiltöne stattfindet. Beobachtet man z. B. den schwebenden Zweiklang $gis^1 a^1$ oder $g^1 a^1$, so werden die Primärtöne nebeneinander getrennt vernommen. Wenn aber eine Klangzerlegung eintritt, wird man der lediglich bei und aus der Zusammensetzung resultierenden Gestalt der physikalischen Klangwelle einen Einfluß auf die Wahrnehmung absprechen müssen. Es wäre zu erwarten, daß die Primärtöne rein und glatt ohne Intensitätsschwankungen gehört würden. In der Tat verhält es sich auch speziell mit den Tönen gis^1 und a^1 und in analogen Fällen so, jedoch treten daneben Schwebungen auf, die als solche eines zwischen den Primärtönen gelegenen, von Stumpf[1]) als Zwischenton bezeichneten, Tones aufgefaßt werden, und bei anderen Zweiklängen erscheinen die Primärtöne selbst schwebend. Man wird daher zu der Annahme gedrängt, daß trotz der Zerlegung eine gegenseitige Beeinflussung der Primärtöne im Sinne des Schwebens stattfindet. Die Lösung dieses Problems ist eine Aufgabe der Theorie des Hörens und wird im Abschnitte V d weiter erörtert werden.

b) Die Kombinationstöne.

Der Autor, welcher die Schwebungen zuerst erwähnt hat, dürfte Mersenne (1588 bis 1648) gewesen sein. Ungefähr 100 Jahre nach ihm wurde von dem Violinisten Tartini (1714) und dem deutschen Organisten Sorge[2]) eine andere sekundäre Klangerscheinung entdeckt, auf die wir heutigentags die Bezeichnung Differenztöne anwenden, weil es sich dabei um Töne handelt, deren Schwingungszahl gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Primärtöne ist. Tartini und Sorge hörten zwar solche Töne, haben aber größtenteils irrtümliche Angaben über ihre Höhe gemacht. Die englischen Physiker Young und Gough stritten später darüber, ob der „tiefe harmonische Ton“ — so sagte man damals statt Differenzton, während in der neueren englischen Literatur die Benennung „Resultierender Ton“ viel gebraucht wird — mechanisch in der Luft entstehe, wie ersterer behauptete, oder ob er durch die Einbildungskraft der Seele erzeugt werde. Vieth[3]) hat diese Kontroverse summarisch dargestellt, aber erst Hällström[4]), der von Vieth den Ausdruck „Kombinationston“ übernahm, erkannte die Schwingungszahlenverhältnisse richtig. Der erste, der nach Hällström den Gegenstand wieder einer fundamentalen Bearbeitung unterzog, war Helmholtz[5]). Er fand (1856), daß zwei primäre Töne von den Schwingungs-

[1]) Tonpsychologie **2**, 480 ff., 1890. — [2]) Vorgemach der musikalischen Komposition usw., Lobenstein 1745. — [3]) Gilberts Ann. **21** (1805). — [4]) De tonis combinationis; Diss., Aboae 1819 u. Pogg. Ann. **24**, 438, 1832. — [5]) Lehre von den Tonempfindungen (5), S. 253 ff. (Daselbst auch weitere Literaturangaben.)

zahlen h und t (wobei $h > t$) unter passenden Umständen nicht nur einen Ton $h—t$, sondern auch einen Ton $h + t$ ergeben, und faßte diese beiden Klassen von sekundären Tönen, die er als Differenz- und Summationstöne unterschied, unter dem Namen Kombinationstöne zusammen. Seitdem haben die deutschen Akustiker diese Nomenklatur allgemein acceptiert.

Hällström hatte zunächst rein theoretisch den Satz abgeleitet, daß zwei Primärtöne h und t einen Kombinationston $h—t$ erzeugen. Die gleiche Überlegung führte ihn dann aber dazu, neben diesem ersten Tone einen zweiten von der Form $t — [h—t] = 2t—h$, einen dritten $h — [2t—h] = 2(h—t)$, einen vierten $[2t—h] — [h—t] = 3t—2h$ usw. zu postulieren. Behandelt man so jeden durch bloße Subtraktion gewonnenen Differenzton — die Summationstöne wollen wir vorerst beiseite lassen — als neuen Primärton, der mit allen schon vorhandenen wieder Differenztöne hervorbringt, und berücksichtigt dabei, was von seiten Hällströms noch nicht geschah, auch die Obertöne der Primärtöne [1]), so ergibt sich eine endlose Menge von Differenztönen, wobei allerdings mehr oder weniger zahlreiche Koinzidenzen vorkommen. In Wirklichkeit werden nun immer nur einer oder einige von den durch die Rechnung zu erhaltenden Differenztönen wahrgenommen, wie auch schon Hällström ausdrücklich hervorhob. Wieviele ihrer aber in einem gegebenen Falle sind und welches Intensitätsverhältnis zwischen ihnen obwaltet, darüber läßt sich zurzeit noch keine endgültige Regel aufstellen. Was bisher an empirisch gefundenen Tatsachen bezüglich der Hörbarkeit und der sonstigen Eigenschaften der Differenztöne vorliegt, ist im wesentlichen das Folgende.

Die subjektive Deutlichkeit der Differenztöne und ihre Hörweite wächst im allgemeinen mit der Höhenlage der Primärtöne. Sind die letzteren selbst tief, so sind die noch tieferen Differenztöne oft recht schwer aus dem Klange herauszuhören. Koenigsche Gabeln mit Resonanzkasten, deren Tonhöhen der zweigestrichenen Oktave angehören, lassen, mit dem Bogen kräftig gestrichen, ihre Differenztöne bis auf 50 cm Abstand hören; in der dreigestrichenen Oktave wächst die Entfernung auf 7 bzw. 13 und 15 m. Den Differenzton 800 zweier leicht gegeneinander geschlagener Appunnscher Gabeln von 4000 und 4800 Schwingungen höre ich etwa 18 m weit. Auch die Differenztöne der Galtonpfeifen sind sehr leicht und weit vernehmlich; Stumpf und Meyer haben solche noch bei Primärtönen aus der oberen Hälfte der sechsgestrichenen Oktave gehört. Es werden aber sogar Differenztöne wahrgenommen, wenn die Primärtöne jenseits der oberen Hörgrenze des Beobachters liegen, also an sich unhörbar sind. A. M. Mayer [2]) fand diese Tatsache bei Versuchen mit Lockpfeifen und Gabeln, und auch Koenig [3]) hat hierüber einige tatsächliche Angaben gemacht, die ihn selbst und mehrere andere zuverlässige Versuchspersonen betrafen und keinen Zweifel übrig lassen.

Erhöht oder vertieft man kontinuierlich den einen von zwei anfangs unisonen sehr hohen Tönen — ich [4]) habe derartige Versuche an Galtonpfeifen bis zu 12000 Schwingungen hinauf ausgeführt — so treten erst langsame,

[1]) Vgl. Ohm, Pogg. Ann. **47**, 465, 1839. — [2]) Report of the Meeting of the British Association for the Advancement of Science. Oxford 1894, p. 573. — [3]) Wiedemanns Ann. **69**, 636, 1899. — [4]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorg. **21**, 166 ff., 1899.

dann rascher und rascher werdende Schwebungen auf. Wenn ihre Zahl ungefähr 30 pro Sekunde beträgt, gesellt sich die erste Spur eines sehr tiefen, brummenden Differenztones hinzu, der dann mit wachsender Frequenz der Schwebungen klarer und höher wird. Verlegte ich das Primärtonpaar successive in immer tiefere Regionen der Skala, so fand bei einer ungefähr 30 Schwingungen betragenden Differenz der Tonhöhen stets eine Differenztonwahrnehmung statt, in der Regel schon viel früher. In den mittleren Oktaven kann man bereits bei 16, 14, auch 10 Schwebungen einen äußerst tiefen Differenzton hören; allerdings besteht hier die Möglichkeit, um nicht zu sagen Wahrscheinlichkeit, daß derselbe von Obertönen herstammt, die ja untereinander ebensogut Schwebungen und Differenztöne erzeugen wie die Primärtöne, wenn auch meist entsprechend schwächere. Bei Primärtönen unterhalb der kleinen Oktave wird es mir schwierig, allertiefste Differenztöne aus dem Klange herauszuhören, während es bei den ganz hohen Oktaven sehr leicht ist.

Vergrößert man also, vom Unisono ausgehend, das Intervall der beiden Primärtöne allmählich, so hört man, von den untersten Oktaven abgesehen, anfangs nur Schwebungen, dann während eines kürzeren oder längeren Spatiums Schwebungen und Differenzton zugleich und schließlich nur noch den letzteren allein. Dieser Ton $h—t$ ist in seiner größten Tiefe an sich rauh wie alle tiefsten Töne, aber auch mit zunehmender Höhe haftet ihm noch ein gewisser Mangel an Glätte an, vermutlich, weil man geneigt ist, die Rauhigkeit der Primärtonschwebungen als eine solche des Differenztones aufzufassen.

Liegen die Primärtöne hoch, so bewirken relativ kleine Intervalländerungen verhältnismäßig beträchtliche Höhenschwankungen des ersten Differenztones $(h—t)$. Nehmen wir beispielsweise an, die Primärtöne hätten die Schwingungszahlen 1000 und 1032, so hören wir als Differenzton das Kontra-C. Erhöhen wir nun kontinuierlich die Differenz auf weitere 32 Schwingungen, so durchläuft der Differenzton eine ganze Oktave, und rund vier Oktaven, wenn wir das Primärtonintervall bis zur Quinte erweitern. Dabei verändert sich der Differenzton aber stetig, nicht, wie früher gelegentlich von verschiedenen Seiten behauptet ist, sprungweise. Analog verhält es sich mit dem zweiten Differenzton $2t—h$, welcher herabsteigt, wenn der erste aufsteigt — beide kreuzen sich in dem Augenblick, wo das Primärtonintervall die Quinte erreicht — und mit den Differenztönen noch höherer Ordnung.

Große Stärke der Primärtöne ist für die Wahrnehmung der Differenztöne zwar nützlich, aber lange nicht so wichtig, wie Helmholtz ursprünglich glaubte. Man kann dieselben unter Umständen auch mit verstopften Ohren oder bei sonst irgendwie erzeugter Schwächung der Primärtöne wohl vernehmen. Stumpf teilt sogar in der Tonpsychologie mit, er habe zu Zeiten, wo er viel darauf achtete, Differenztöne an der Violine, am Klavier und bei gedackten Pfeifen hundertfach selbst dann gehört, und zwar gerade besonders deutlich, wenn die Tongebung die schwächste war, die sich überhaupt herstellen ließ. Dahingegen gibt es in allen Fällen ein Optimum des Stärkenverhältnisses der Primärtöne, welches oft, aber nicht notwendig mit der Gleichheit der Intensitäten zusammenfällt. So pflegt der zweite Differenzton hervorzutreten, wenn der tiefere Primärton überwiegt, offenbar weil dessen Oktave $2t$ dadurch stark genug zur Bildung des Tones $2t—h$ wird. Ferner

finde ich, daß das Intervall, und bei gleichem Intervall die Höhenlage der Primärtöne von Bedeutung ist.

Bevorzugt scheinen hinsichtlich ihrer Stärke die Differenztöne von der Schwingungszahl n, welche gehört werden, wenn die Schwingungszahlen der Primärtöne im Verhältnis $mn:(m+1)n$ stehen. Töne vom Verhältnis $3n:5n$ ergeben $2n$ in tiefer Lage wenig deutlich, in höherer Lage besser. Beim Intervall 4:7 höre ich, wenn Gabeln und Flaschentöne benutzt werden, den ersten Differenzton 3 so gut wie gar nicht, wohl aber den zweiten $2.4—7 = 1$. Auch bei der kleinen Sexte (5:8) ist der Differenzton 2 ($= 2t—h$) gewöhnlich stärker als 3 ($= h—t$). Der erste Differenzton 4 des Verhältnisses 5:9 ist ebenfalls durchweg bedeutend schwächer als 1. Ähnlich steht es mit 7:12 und überhaupt mit solchen Intervallen, die zwischen Quinte und Oktave und näher der letzteren liegen. Versuche hierüber stellt man am besten in der Weise an, daß man zwei möglichst obertonfreie Töne anfänglich unison stimmt und dann mit dem einen die Tonleiter hinauf geht. Es zeigt sich dabei [1]), daß der erste Differenzton bis über die Quinte hinaus gut und laut zu hören ist, weiterhin aber schwächer wird und bei der großen Septime erlischt. Er taucht auch bei fortgesetzter Vergrößerung des Intervalls über die Oktave hinaus, wobei er der Rechnung nach zwischen die Primärtöne fällt, nicht wieder auf. Sog. zwischenliegende Differenztöne sind also, sofern sie nicht etwa durch gleich hohe, von Obertönen herstammende Differenztöne höherer Ordnung vorgetäuscht werden, nicht hörbar, wenigstens nicht bei der gewöhnlichen Art der Beobachtung. Unter Anwendung besonderer Versuchsbedingungen sind sie nach Krueger [2]) allerdings zu vernehmen, aber jedenfalls „erheblich leiser und undeutlicher als Differenztöne derselben Ordnung bei Klängen innerhalb der Oktave".

Max Meyer [3]), der sich viel mit Differenztönen beschäftigt hat, untersuchte Klänge von Stimmgabeln auf Resonanzkasten. Es wurden beim Intervall 4:5 die Differenztöne 1, 3 und gelegentlich 6 gehört. 5:6 ergab 1, 3, 4, (7). 4:7 ließ die Töne 6, 5, 3, 1 und 6:7 die Töne 5, 4, 1 hören. Bei 7:8 wurden 6, 5, (4), 1 und bei 8:9 außer 1 noch 7, 6, 5 vernommen. Bei 9:10 war 7, 6 und 1 stark, 8 zuweilen deutlich. Das Verhältnis 16:17 ergab außer 1 nur 10 und 12, der Dreiklang 5:6:16 lediglich, aber sehr stark 1. Dagegen wurden beim Molldreiklang 10:12:15 neben den Primärtönen die den Zahlen 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, (9) entsprechenden Kombinationstöne gehört. Meyer betont zwar, daß Obertöne der Gabeln mit bloßem Ohre nicht hörbar gewesen seien; dennoch glaube ich, daß seine Ergebnisse, die übrigens zum Teil mit der Stärke der Primärtöne variierten und die ich nicht durchweg bestätigen kann, der Hauptsache nach auf die Mitwirkung von Obertönen zurückzuführen sind. Wenn Meyer zu dem Schlusse kommt, man könne nur durch das Experiment ermitteln, welche Differenztöne einen gegebenen Zweiklang begleiten, und dürfe sich nie auf irgend eine Regel verlassen, so möchte ich für meine Person hierin ihm beistimmen. Krueger

---

[1]) Vgl. meine Abhandlungen in Pflügers Arch. **78**, 517 ff. und **83**, 76, 1900. — [2]) Wundts Philos. Stud. **17**, 208 ff., 1901. — [3]) Über Kombinationstöne usw. Berliner Diss. 1896; auch Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **11**, 177 und ebenda **16**, 1, 1898.

dagegen hat in der eben erwähnten Abhandlung auf Grund seiner systematischen Beobachtungen über Zweiklänge als im allgemeinen gültig den Satz aufgestellt, daß zwei annähernd gleich starke Primärtöne von mittlerer Lage einen Summationston nebst vier bis fünf Differenztönen erzeugen und daß diese Kombinationstöne nicht an das Dasein von Obertönen gebunden sind; die Tonhöhen der Differenztöne seien dabei derart zu berechnen, daß man zunächst die Schwingungszahlen der Primärtöne und dann fortgesetzt die beiden kleinsten Schwingungszahlen voneinander subtrahiere.

Wie man sieht, sind die Ansichten über die Zahl und die Stärke der Kombinationstöne, welche irgend ein bestimmtes Intervall erwarten bzw. hören läßt, recht different, was offenbar in der Verschiedenheit der jeweiligen objektiven und subjektiven Beobachtungsbedingungen seine Ursache hat. Um so weniger Zweifel herrscht dafür bezüglich eines anderen, hier noch zu erwähnenden, weil theoretisch wichtigen, Punktes; ich meine die Tatsache, daß die Kombinationstöne sich in Zusammenklängen ganz wie primäre Töne verhalten. Ein Differenzton, der einem anderen Differenzton oder einem primären der Höhe nach hinreichend nahe kommt, schwebt mit demselben, und bei geeigneter Höhendistanz verschmelzen, wie wenigstens Krueger[1]) behauptet, zwei Differenztöne (oder ein Differenzton und ein Primärton) zu einem Zwischenton, gerade wie zwei Primärtöne es unter den gleichen Umständen tun würden. Krueger weist zugleich darauf hin, daß die mit der Verschmelzung zweier Differenztöne zu einem Zwischenton verbundene Höhenänderung als Erklärung dienen könne für die von einzelnen Autoren gemachte merkwürdige Angabe, sie hörten Differenztöne zuweilen bis um einen halben Ton zu hoch. Ein dem Musiker bekanntes Beispiel für Differenztonschwebungen sind die Stöße der Töne $h—t$ und $2\,t—h$, welche auftreten, wenn h und t eine verstimmte Quinte bilden. Bei genügend großem und sonst passendem Intervall erzeugen zwei Kombinationstöne oder ein Kombinations- und ein primärer Ton auch einen neuen Kombinationston.

Die Summationstöne sind bei weitem weniger leicht zu vernehmen als die Differenztöne. Helmholtz hörte sie bei Benutzung von Stimmgabeln mit Resonanzröhren nur mit großer Mühe. Besser gelang es ihm mit Orgelpfeifen, zumal wenn das Ohr den Mundöffnungen derselben genähert wurde. Sehr deutlich waren sie am Harmonium, und als ganz besonders geeignet zu ihrer Erzeugung erwies sich die Helmholtzsche Doppelsirene[2]), die sogar Summationstöne zweiter Ordnung hören ließ. Von den späteren Forschern haben manche überhaupt niemals Summationstöne bemerken können, wovon verschiedene in der Literatur sich vorfindende Mitteilungen Zeugnis ablegen. Am deutlichsten spricht sich in diesem Sinne Hermann[3]) aus, indem er sagt, die Summationstöne würden von vielen auch unter den günstigen Bedingungen, welche die Doppelsirene darbiete, nicht wahrgenommen, und speziell ihm selbst sei es nie geglückt, sie zu hören oder jemand zu finden, der es vermocht hätte. Andere Autoren haben betont, daß die Summationstöne nur durch Instrumente mit scharfer Klangfarbe, also mit

---

[1]) Vgl. Wundts Philos. Stud. **17**, 187 und 207. — [2]) Über Bau und Verwendung derselben vgl. Lehre v. d. Tonempf. (5), S. 269 f. und Beilage 13. — [3]) Pflügers Arch. **49**, 500, 1891.

vielen Obertönen, und nicht in hohen Lagen hervorgebracht würden. So G. Appunn, den Preyer[1]) zitiert. Preyer selbst stimmt ihm zu, abgesehen von einem Ausnahmefall, der darin bestand, daß auch Gabeln mit Kautschukringen, welche die harmonischen Obertöne abdämpfen sollten, bei starkem Tönen Summationstöne ergaben; aber diese Ausnahme ist insofern zweifelhaft, als, wie man jetzt weiß, die Kautschukringe den erwähnten Effekt nur in sehr beschränktem Maße haben. Stumpf[2]) konnte ebenfalls die Summationstöne, die er am Harmonium, an der Sirene und an Zungenpfeifen, nicht aber bei Flötenpfeifen beobachtete, von den Obertönen herleiten und sie somit für Differenztöne höherer Ordnung erklären.

Daß dies rechnungsmäßig angängig ist, darauf haben schon Röber (1856), R. Fabri (1860), G. Appunn[3]) u. a. aufmerksam gemacht mit dem Hinweis, daß $2h - (h - t) = h + t$ sei. Auch R. Koenig[4]) ist dafür eingetreten, daß die Summationstöne im allgemeinen von Obertönen herrührten, verfuhr aber ungenau hinsichtlich der Bestimmung der betreffenden Obertöne. Da ein jüngerer Autor ihm hierin gefolgt ist, dürfte es nützlich sein, an dieser Stelle einige Formeln zur Ableitung der Summationstöne mitzuteilen, nämlich:

(1) . . . $h + t = h + t + ah - ah$ oder $h + t = ah - [(a - 1)h - t]$
(2) . . . $h + t = h + t + at - at$ oder $h + t = at - [(a - 1)t - h]$
(3) . . . $h + t = h + t + ah - ah + at - at$ oder $h + t = [ah - (a - 1)t] - [(a - 1)h - at]$
(4) . . . $h + t = h + t + ah - ah + bt - bt$ oder $h + t = [ah - bt] - [(a - 1)h - (b + 1)t]$
(5) $ah = bt$; $h + t = h + t + ah - bt$ oder $h + t = (a + 1)h - (b - 1)t$
(6) $ah = bt$; $h + t = h + t + bt - ah$ oder $h + t = (b + 1)t - (a - 1)h$

Diese Formeln, die übrigens zum Teil auf zwischenliegende Differenztöne führen, sind nur anwendbar, sofern die vorkommenden Differenzen positiv sind. Außerdem müssen a und b selbstverständlich ganze Zahlen sein.

Eine Entscheidung darüber, ob wirklich zwei Primärtöne ohne Mitwirkung von Obertönen einen Summationston hervorzubringen vermögen, wäre etwa in der Weise zu versuchen, daß man von sämtlichen Tonpaaren, welche rechnungsmäßig einen Summationston als Differenzton höherer Ordnung ergeben würden, je einen Ton durch Interferenz beseitigte. Krueger[5]) berichtet über einige hierauf bezügliche Experimente. Allein dieselben sind alle deswegen unzureichend, weil dabei immer nur ein einzelner Oberton berücksichtigt worden ist. Bis auf weiteres wird man daher mit der übrigens keineswegs unwahrscheinlichen Möglichkeit zu rechnen haben, daß es sowohl echte wie unechte Summationstöne gibt.

Wenn man eine aus zwei Grundtönen h und t nebst diversen Obertönen durch einfache Superposition zusammengesetzte Klangwelle nach Fourier

---

[1]) Wiedemanns Ann. **38**, 131, 1889. — [2]) Tonpsychol. **2**, 255, 1890. — [3]) Ant. Appunn hat später der Auffassung seines Vaters G. Appunn, daß die Summationstöne Differenztöne höherer Ordnung seien, in einer übrigens nicht ganz einwandfreien Untersuchung (Wiedemanns Ann. **42**, 338 bis 343, 1891) direkt widersprochen. — [4]) Pogg. Ann. **157**, 217 ff., 1876. Expériences d'acoustique, Paris 1882, p. 124 ff. — [5]) Wundts Phil. Stud. **17**, 278 ff., 1901.

zerlegt, so erhält man weder einen Differenz- noch einen Summationston. Da das Ohr ebenso analysiert und doch Kombinationstöne hört, so müssen für diese besondere, gleichsam eine Tonquelle für sich bildende Existenzbedingungen vorhanden sein. Bei der Helmholtzschen Doppelsirene, dem Harmonium, den Appunnschen Zungenkasten und — wie ich kürzlich in einer noch unveröffentlichten Untersuchung fand — auch bei laut tönenden Telephon- sowie gewissen anderen Membranen bestehen dieselben in physikalischen Verhältnissen. Denn die Kombinationstöne der genannten Instrumente bringen gleichgestimmte Resonatoren zum Mitschwingen. Für Harmonium und Doppelsirene hat Helmholtz[1]) dies zuerst gezeigt und folgendermaßen erklärt. Das Wesentliche ist, daß beide Primärtöne durch Anblasen aus einem gemeinsamen Windraume erzeugt werden. Die in demselben enthaltene Preßluft wird durch die Töne stark erschüttert und durch jede Öffnung Luft geblasen, die schon durch den anderen Ton in schwingende Bewegung versetzt ist, also nicht mit gleichmäßiger, sondern mit periodisch zu- und abnehmender Stärke austritt. Wenn aber die Amplitude einer Tonbewegung in solcher Weise schwankt, so geht der einfache Ausdruck für die Bewegung mit konstanter Amplitude:

$$q = B\ [1 - \sin 2\pi n t]$$

$$\text{über in: } q = B_1\ [1 - \sin 2\pi m t]\ [1 - \sin 2\pi n t]$$

$$= B_1\ [1 - \sin 2\pi m t - \sin 2\pi n t + \frac{1}{2}\cos 2\pi\ (m - n)t - \frac{1}{2}\cos 2\pi\ (m + n)t]$$

und es werden somit außer den primären Tönen m und n auch die Kombinationstöne $m + n$ und $m - n$ gehört werden; genauer genommen entstehen sogar noch mehr Töne, da der Vorgang in Wirklichkeit viel komplizierter ist, als die vorstehende Gleichung zum Ausdruck bringt. (Dieselbe entspricht überdies auch insofern nicht ganz den Tatsachen, als nach ihr auch zwischenliegende Differenztöne hörbar und die Summationstöne ebenso laut sein müßten wie die Differenztöne.)

Doppelsirene, Harmonium, Zungenkasten und die erwähnten Membranen sind nun aber bis jetzt die einzigen Instrumente, welche außerhalb des Ohres nachweisbare, also objektive, Kombinationstöne geben. Die Differenz- und Summationstöne anderer Tonquellen sind als ausschließlich im Ohre entstehende, also subjektive, Töne anzusehen, da es verschiedenen Forschern[2]) trotz Anwendung feiner Reaktionsmethoden nicht gelungen ist, ihre Existenz in der Luft zu konstatieren.

---

[1]) Lehre v. d. Tonempfindungen (5), S. 259 f. u. Beilage 16. Weitere Abhandlungen über den physikalischen Nachweis der Kombinationstöne sind: O. Lummer, Verhandl. d. Berl. physik. Gesellsch. 1866 (7. Juli), S. 66. Rücker u. Edser, Philos. Magaz. **39**, 341 bis 357, 1895. (Diese Autoren sind auch für die Existenz echter, nicht als Differenztöne zu betrachtender objektiver Summationstöne eingetreten.) Forsyth and Sowter, Proceedings of the Roy. Soc. of London **63**, 396, 1898. K. L. Schaefer, Pflügers Arch. **78**, 519, 1900. — [2]) R. Koenig, Pogg. Ann. **157**, 221, 1876; W. Preyer, Akustische Untersuchungen, Jena 1879, S. 13 ff.; M. Wien, Wiedemanns Ann. **36**, 853, 1889; Hermann, Pflügers Arch. **49**, 516, 1891; Rücker u. Edser, Philos. Mag. **39** (1895); Forsyth and Sowter, Proc. Roy. Soc. London **63** (1898); Krueger, Wundts Philos. Stud. **17**, 218, 1901.

Besitzen wir somit im Ohre einen Mechanismus, durch welchen Kombinationstöne den von außen kommenden Primärtönen gewissermaßen hinzugefügt werden, so ist zu erwarten, daß beim Angeben eines Primärtonpaares auf dem Harmonium oder etwa der Doppelsirene neben den objektiven Differenz- und Summationstönen auch subjektive gehört werden. Das ist denn auch in der Tat der Fall und es ist besonders bemerkenswert, daß die objektiven Töne dabei dieselben sind wie die subjektiven. An und für sich wäre es ja möglich, vielleicht gar wahrscheinlicher, daß der physikalische Prozeß im Harmonium Kombinationstöne von anderer Zahl und Höhe hervorriefe als die entsprechende physiologische Einrichtung. Indessen trifft dies, wie gesagt, nicht zu, wenigstens nicht nach den bisherigen, freilich noch keineswegs erschöpfenden, Erfahrungen. Soviel wir wissen, wird jeder gehörte Kombinationston des Harmoniums (und der anderen analog funktionierenden Apparate), falls er nicht überhaupt zu schwach ist, um einen Resonator zu erregen, auch durch einen solchen verstärkt, und wenn man während der Beobachtung des Kombinationstones im Resonator den Versuch derart modifiziert, daß jeder der beiden Primärtöne von einem gesonderten Windraum aus angeblasen wird [1]), so verstummt der Resonator alsbald, der betreffende Kombinationston klingt aber, nunmehr subjektiv und übrigens nur wenig geschwächt, weiter. Speziell in der früher erwähnten Beziehung, daß der erste Differenzton zweier Primärtöne, wenn deren Höhendistanz sich der großen Septime nähert, sehr schwach wird und bei weiterer Vergrößerung des Intervalls unter den gewöhnlichen Bedingungen für das Ohr verschwindet, fand ich [2]) eine so gut wie vollkommene Übereinstimmung zwischen den objektiven und den subjektiven Differenztönen. Dieses Verhalten spricht von den vorneherein dafür, daß die entotischen Kombinationstöne auf ähnliche Weise physikalisch zu Stande kommen wie die objektiven außerhalb des Ohres. Auf ihre Entstehung wird im Abschnitte V zurückzukommen sein.

c) Die Variations- und sog. Unterbrechungstöne.

Schon im Jahre 1844 ist von Seebeck in seiner Abhandlung über die Definition des Tones [3]) eine Überlegung darüber angestellt worden, was geschieht, wenn die Amplitude eines einfachen Tones von der Schwingungszahl n nicht konstant bleibt bzw. in gleichmäßigem Abklingen sinkt, sondern m mal pro Sekunde pendelperiodisch auf und ab schwankt. Er kam zu dem Ergebnis, daß dann neben dem Tone n noch die Töne $n + m$ und $n - m$ auftreten müßten, verfolgte aber den Gegenstand nicht experimentell. Dies hat erst Helmholtz [4]) getan, der darüber Nachstehendes mitteilt: „Der untere Kasten meiner Doppelsirene klingt stark mit, wenn die Gabel a^1 vor seine untere Öffnung gehalten wird und die Löcher alle gedeckt sind, nicht aber, wenn die Löcher einer Reihe offen sind. Läßt man nun die Sirenenscheibe rotieren, so daß die Löcher abwechselnd offen und gedeckt sind, so erhält man eine Resonanz der Stimmgabel von periodisch wechselnder Stärke.

---

[1]) Vgl. Lehre v. d. Tonempf. (5), S. 261 u. meine Abhandlung in Pflügers Arch. 83, 74. — [2]) Pflügers Arch. 78, 521 u. 83, 76, 1900. — [3]) Pogg. Ann. 63, 365 f. — [4]) Lehre von den Tonempfindungen (1), S. 597, 1863.

Ist n die Schwingungszahl der Gabel, m die Zahl, welche angibt, wie oft ein einzelnes Loch des Kastens geöffnet wird, so ist die Stärke der Resonanz eine periodische Funktion der Zeit, also im einfachsten Falle zu setzen gleich

$$1 - \sin 2\pi mt.$$

Die Schwingungsbewegung der Luft erhält also dann die Form[1])

$$(1 - \sin 2\pi mt) \sin 2\pi nt = \sin 2\pi nt + \frac{1}{2} \cos 2\pi (m + n) t$$

$$- \frac{1}{2} \cos 2\pi (n - m) t$$

und man hört deshalb außer dem Tone n auch noch die Töne $m + n$ und $n - m$. Dreht sich die Sirenenscheibe langsam, so ist m sehr klein, und die genannten Töne sind einander sehr nahe, so daß sie Schwebungen geben. Bei rascher Drehung dagegen trennt sie das Ohr."

Solche Töne von der Form $n + m$ und $n - m$ pflegt man gegenwärtig als Variationstöne zu bezeichnen. Dieser Ausdruck stammt von Radau[2]), welcher in ähnlicher Weise wie Seebeck und Helmholtz berechnete, daß der Ton einer rotierenden Klangplatte sich unter gewissen Bedingungen in einen höheren und einen tieferen spalten müsse. Stefan[3]) bestätigte Radaus rein theoretische Deduktion durch Versuche folgender Art. Dreht man eine tönende Scheibe vor dem Ohre, so daß nacheinander ihre vier Abteilungen demselben gegenüber zu stehen kommen, so hört man den Ton bei jeder Umdrehung viermal anschwellen und verlöschen. Bei langsamer Drehung schwebt der Ton, bei schnellerer tritt allmählich die Spaltung ein. Dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn man eine Stimmgabel in eine Zentrifugalmaschine oder Drehbank einspannt, anstreicht und vor dem Ohre rotieren läßt. Desgleichen kann auch eine Glocke zu diesem Zwecke benutzt werden. Die bequemste Methode zur Erzielung von Variationstönen ist aber ein ziemlich gleichzeitig von Mach und Stefan[3]) gefundenes und benutztes Verfahren, welches darin besteht, daß man vor einer klingenden Gabel eine Scheibe mit kreisförmig angeordneten, gleich großen und gleich weit voneinander abstehenden Löchern rotieren läßt. Jedesmal, wenn eine der Öffnungen die Gabel passiert, wird der Ton wie durch einen Resonator verstärkt; man erhält also in der Sekunde so viel Tonstöße, wie Löcher an der Gabel vorüberkommen, und kann die Anzahl derselben durch Wechsel der Umdrehungsgeschwindigkeit leicht beliebig variieren.

Wenn die eben erwähnte mathematische Ableitung der Variationstöne richtig ist, woran kaum zu zweifeln sein dürfte, so sind dieselben physikalisch bedingte, objektive Töne. In der Tat bringen sie denn auch Resonatoren zum Mittönen, wie schon von Stefan und Beetz in vereinzelten Fällen und neuerdings in größerem Umfange von mir und Abraham[4]) gezeigt worden ist. Unter diesen Umständen haben die Variationstöne an sich keine besondere theoretische Bedeutung für die Physiologie des Hörens; wohl aber gilt dies von gewissen Tönen, welche die Variationstöne unter geeigneten Be-

[1]) Im Original steht irrtümlicherweise am Schlusse der Formel: $(m + n)t$. — [2]) Moniteur scientifique 1865, p. 430 und 1866, p. 792. — [3]) Sitzungsber. d. k. k. Akad. d. Wissensch. z. Wien., mathem.-naturw. Kl., **53** (2), 696 und **54** (2), 598, 1866. — [4]) Pflügers Arch. **88**, 482, 1901.

dingungen begleiten, und denen nach unserer oben gewählten Bezeichnung die Schwingungszahl m zukommt.

Woher kommen diese Töne? Am nächsten liegt es meines Erachtens, sie als Kombinationstöne anzusehen. Sowohl der höhere Variationston und der primäre Ton als auch der Primärton und der tiefere Variationston ergeben m als Differenz ihrer Schwingungszahlen, und der Höhenunterschied der beiden Variationstöne ist gleich $2\,m$. Wenn daher ein Primärton mit seinen Variationstönen zusammen erklingt, so wird man, der Differenztonbildung günstige Verhältnisse selbstverständlich vorausgesetzt, geradezu mit Bestimmtheit erwarten müssen, daß der zweifach bedingte und eventuell durch seine Oktave $2\,m$ verstärkte Differenzton m hörbar sei. Demgemäß hat auch A. M. Mayer[1]), als er den intermittierenden Klang einer c^2-Gabel beobachtete und dabei außer dem Primärtone c^2 und den Variationstönen e^2 und g^1 noch ein c^0 hörte, diesen letzteren Ton (den er übrigens in der beigefügten Notenübersicht falsch angibt) als Differenzton der Variationstöne und des Gabeltones aufgefaßt.

Dagegen haben viele andere Akustiker und Psychophysiker, namentlich R. Koenig, diese sozusagen natürlichste Erklärungsmöglichkeit übersehend oder ignorierend, Gewicht darauf gelegt, daß m gleich der Anzahl der Stöße pro Sekunde ist, in welche der Primärton durch die Versuchsanordnung zerlegt wird, und den Ton m dahin interpretiert, daß er ein Unterbrechungston sei. Diese Autoren sind nämlich der Ansicht[2]), daß das Ohr einen Ton von der Schwingungszahl x nicht nur dann vernimmt, wenn es von x Pendelschwingungen pro Sekunde getroffen wird, sondern auch, wenn ein anderer Ton von der Schwingungszahl y durch x innerhalb der Sekunde in gleichen Zeitabständen aufeinanderfolgende Pausen oder Intensitätsremissionen unterbrochen wird, und bezeichnen einen solchen Ton x eben als Unterbrechungston.

Koenig[2]) konstatierte, als er nacheinander verschieden hohe Gabeln vor eine rotierende Löcherscheibe hielt, daß der „Intermittenzton" bei den tieferen Gabeln schwach war und neben den Variationstönen sehr zurücktrat, bei den höchsten und sehr starken Gabeln (c^4 und c^5) aber eine große Intensität hatte, während hier die Variationstöne kaum oder gar nicht hörbar waren. Abraham und ich[3]) konnten die Richtigkeit dieser Beobachtung bestätigen. Dieselbe widerspricht auf den ersten Blick scheinbar, aber auch nur scheinbar, der Auffassung des Tones m als eines Kombinationstones. Tiefe Gabeln geben entsprechend tiefe Variationstöne, und die Differenztöne tiefer Töne sind, wie schon hervorgehoben wurde, viel schwächer als solche hoher Primärtöne. Wenn also m bei der Anwendung tieferer Gabeln nur leise neben den relativ lauten Variationstönen gehört wird, so ist das gewiß kein Beweis gegen seine

[1]) Americ. Journ. of Science and Arts 9, April 1875. — [2]) Die wichtigsten Arbeiten, in welchen dieselbe vertreten worden ist, sind: R. Koenig, Pogg. Ann. 157, 177 ff., 1876 und Quelques expériences d'acoustique 9, Paris 1882. Dennert, Arch. f. Ohrenheilk. 24, 171 ff. L. Hermann, Pflügers Arch. 56, 485 ff., 1894. (Siehe auch Hermanns verschiedene Abhandlungen zur Vokalfrage in Pflügers Arch.) W. Wundt, Philos. Stud. 8, 641 ff., 1893. [Neuerdings hat aber Wundt diesen Standpunkt zugunsten der von mir und Abraham gegebenen Erklärung der Unterbrechungstöne verlassen. (Grundzüge der Physiolog. Psychol. (5), 2, 1902.)] Ebbinghaus, Grundzüge der Psychol. 1, 312, 1902. — [3]) Pflügers Arch. 88, 475, 1901.

Differenztonnatur. Wenn andererseits die Gabeln c^4 und c^5 bei mäßiger Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe keine Variationstöne hören lassen, so kommt dies einfach daher, daß die Variationstöne dem Gabelton zu nahe liegen, um durch das Ohr analytisch von ihm getrennt zu werden. Vorhanden sind sie darum doch, und dann liegt kein Grund vor, den hier kräftigen Ton m nicht als ihren Differenzton zu betrachten. Machen doch auch zwei zugleich klingende Gabeln von den Schwingungszahlen 3200 und 3840 oder ähnliche Tonpaare durchaus den Eindruck eines einzigen Tones, während man daneben sehr laut den Differenzton hört. Wäre m tatsächlich ein „Intermittenzton", wirkte also mit anderen Worten jeder der m Tonstöße, in welche der Ton n durch die periodischen Intensitätsschwankungen verwandelt wird, wie eine einzelne, das Ohr treffende Luftverdichtung, so sollte man erwarten, daß diejenigen Gabeln, welche die lautesten Tonstöße geben, auch die stärksten „Unterbrechungstöne" produzierten. In Wirklichkeit ist indessen eher das Gegenteil der Fall. Gerade die tieferen Gabeln erfahren durch die vorüberpassierenden Löcher der rotierenden Scheibe die kräftigste Resonanz, und gerade sie liefern die schwächsten „Intermittenztöne". Demnach dürfte die Ansicht, daß die hier in Rede stehenden sog. Unterbrechungstöne faktisch nichts anderes als Differenztöne sind, wohl das Richtige treffen.

Nun existieren aber in der akustischen Literatur noch andere Arten von „Unterbrechungstönen".

Wird nach Koenig der Löcherkreis einer Seebeckschen Sirene so eingerichtet, daß die Öffnungen nicht wie üblich gleichen Durchmesser haben, sondern periodisch an Größe zu- und wieder abnehmen, so gelangt ein Ton von periodisch wechselnder Stärke ins Ohr des Beobachters, wenn man den Kreis mit einer Röhre von der Weite der größten Löcher anbläst. Dieser Ton ist der Hauptton, dessen Höhe bekanntlich der Anzahl der pro Sekunde angeblasenen Öffnungen entspricht. Neben ihm hört man aber noch einen Ton, dessen Schwingungszahl der Zahl der Intensitätsmaxima gleichkommt und der von Koenig und seinen Anhängern wiederum als ein „Unterbrechungston" aufgefaßt worden ist, welcher nur dadurch erklärbar sei, daß das Ohr eben jede Art von Periodik als Ton perzipiere. Demgegenüber habe ich[1]) in Gemeinschaft mit O. Abraham gezeigt, daß die „Unterbrechungstöne" dieser Form Resonatoren zum Mitschwingen bringen. Sie sind also physikalischen Ursprungs, und es ist nichts unmotivierter, als ihretwegen dem Ohre die Fähigkeit der Wahrnehmung von Tönen zuzuschreiben, denen keine pendelförmigen Schwingungen zugrunde liegen. Zu dem gleichen Resultate führten unsere Versuche[2]) mit solchen „Unterbrechungstönen", welche entstehen, wenn man eine Sirenenscheibe anbläst, deren Löcherkreis aus alternierenden gleich großen Gruppen von offenen und verstopften Löchern besteht, oder wenn man auf einem rotierenden Zahnrade, an welchem in gleichen Abständen einzelne Zähne fehlen, ein Kartenblatt schleifen läßt. Bei dieser Untersuchung ergab sich ferner, daß die von Hermann[3]) beobachteten Phasenwechseltöne ebenfalls objektive Töne sind und mit den zuletzt erwähnten „Unterbrechungstönen" auf einer Stufe stehen.

---

[1]) Pflügers Arch. **83**, 209, 1901. — [2]) Ebenda **83**, 207 u. **85**, 536 ff., 1901. — [3]) Ebenda **56**, 489 ff., 1894.

Auch auf elektro-akustischem Wege hat man versucht, Tonunterbrechungen zu erzielen; so Zwaardemaker in seiner Arbeit über Intermittenztöne[1]). Derselbe verband ein Blakesches Mikrophon mit einem oder zwei Leclanché-Elementen und der primären Spirale einer kleinen Induktionsspule zu einem Stromkreise, während die sekundäre Spirale zu einem Telephon führte. Diese sekundäre Kette konnte durch eine elektrisch getriebene Stimmgabel 64 mal in der Sekunde geöffnet und geschlossen werden. War sie dauernd geschlossen, während durch das Mikrophon ein Ton auf das Telephon übertragen wurde, so hörte man nur diesen Hauptton. Funktionierte aber während seiner Beobachtung die Unterbrechungsvorrichtung, so vernahm man „ungemein schön einen kräftigen Unterbrechungston" von 64 Schwingungen. War die Unterbrechungsvorrichtung im Gange, ohne daß das Mikrophon erregt wurde, so war von dem Tone 64 so gut wie nichts zu hören. Zwaardemaker ist nicht zu voller Klarheit darüber gelangt, ob sein „Intermittenzton" physikalisch oder physiologisch bedingt war. Abraham und ich[2]) haben seine Versuche in größerem Umfange und teilweise in etwas veränderter Form wieder aufgenommen, wobei vor allem dafür gesorgt ward, daß die Schwingungszahlen der Haupttöne und die Frequenz der Unterbrechungen in möglichst weiten Grenzen variiert werden konnten. Es ergab sich, daß die Angaben Zwaardemakers ungenau sind und die Verhältnisse in Wirklichkeit folgendermaßen liegen. Der Hauptton wird durch die Intermittenzen im allgemeinen geschwächt oder ganz zum Verschwinden gebracht und an seiner Stelle ein mehr oder weniger komplizierter Klang im Telephon gehört. Dieser Klang enthält einen oder zwei charakteristische Teiltöne, deren Schwingungszahlen in gesetzmäßiger Weise von der Höhe des Haupttones und der Anzahl der Unterbrechungen pro Sekunde abhängen und unter ganz speziellen Bedingungen, also gewissermaßen nur ausnahmsweise, der Anzahl der Unterbrechungen gleich werden. Unter allen Umständen handelt es sich dabei um objektive Töne, deren physikalische Herkunft sich leicht und evident durch Resonanzversuche erweisen läßt und deren Erklärung also kein physiologisches Problem ist.

IV. Von den Tonempfindungen in musikalischer Beziehung.

Wenn wir von irgend einem Ton mittlerer Höhe, z. B. vom a^1 mit 435 Schwingungen[3]), ausgehend den nächst höheren und nächst tieferen, von a^1 eben unterscheidbaren Ton aufsuchen, so gelangen wir nach dem früher über die Unterschiedsempfindlichkeit in dieser Region Mitgeteilten etwa zu den Schwingungszahlen 434,6 und 435,4 und schreitet man in gleicher Weise einerseits abwärts, andererseits aufwärts weiter, so erhält man schließlich die ganze Reihe der physiologisch nebeneinander möglichen Töne, bezogen auf den Ausgangston 435. Eine derartige Serie von Tönen, deren jeder von seinen beiden Nachbarn eben merklich verschieden ist,

---

[1]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiolog. Abteil., Supplementband 1900, S. 60. — [2]) Drudes Ann. d. Physik **13**, 996, 1904. — [3]) Das eingestrichene *a* ist der sogenannte Kammerton, die Normaltonhöhe, nach der die Instrumente des Orchesters gemeinsam gestimmt werden. Die Schwingungszahl des Kammertones ist im Laufe der Zeit öfter gewechselt worden. Nach der Pariser Stimmung von 1788 war sie 409, nach der älteren Mozartstimmung etwa 421 usw. Gegenwärtig wird das a^1 meist zu 435 Schwingungen genommen.

besteht aus einer sehr großen Menge von Gliedern. Allein die eingestrichene Oktave würde mehr als 1200 einzelne Töne umfassen.

Bilden wir dagegen von a^1 aus nach oben und unten die Reihe der musikalisch in Betracht kommenden Töne, so ergibt sich eine viel geringere Anzahl. Die tiefsten und höchsten physiologischen Töne benutzt die Musik überhaupt nicht und von den übrigen nur solche, deren Schwingungszahlen zueinander in bestimmten Verhältnissen stehen. Eine Oktave des temperierten Klaviers enthält nur 12, nicht 1200, verschiedene Töne.

Die wichtigsten Schwingungszahlenverhältnisse oder Intervalle sind: Prime (1 : 1), Sekunde (8 : 9), kleine Terz (5 : 6), große Terz (4 : 5), Quarte (3 : 4), Quinte (2 : 3), kleine Sexte (5 : 8), große Sexte (3 : 5), kleine Septime (5 : 9), große Septime (8 : 15). Jeder einigermaßen musikalische Hörer wird diese und andere Intervalle voneinander unterscheiden und ein und dasselbe Intervall, sagen wir die große Terz, als solche erkennen, mag sie in der kleinen oder zweigestrichenen Oktave angegeben werden, mag sie aus den Tönen *c* und *e* oder *g* und *h* bestehen. Es kommt eben nur auf das Verhältnis der Tonhöhen, nicht auf die absoluten Werte, d. h. auf die Lage der Töne in der Tonskala, an, sofern es sich nicht gerade um obertonarme tiefste oder ganz hohe Töne handelt, denen gegenüber unser Intervallurteil ebenso versagt wie die Unterschiedsempfindlichkeit.

a) Konsonanz und Dissonanz.

Unsere musikalische Auffassung teilt die Intervalle in zwei Gruppen ein, in konsonante und dissonante. Schon in der griechischen Musiklehre, welche auf die Pythagoreer, vielleicht gar auf ägyptische Einflüsse zurückgeht, wurden die „symphonischen" von den „diaphonischen" Intervallen gesondert und zu den ersteren Oktave, Quinte und Quarte, zu den letzteren die anderen einschließlich der Terzen gezählt. Die Oktave wurde von jeher als die vollkommenste Konsonanz bezeichnet, während sich im übrigen die Anschauungen über die Grade der Konsonanz in der historischen Entwickelung der Musik wiederholt verschoben haben. Die heutigentags dem allgemeinen Geschmack am besten gerecht werdende Reihenfolge der Konsonanzen dürfte folgende sein: Oktave, Quinte und Quarte, große Terz und große Sexte, kleine Terz und kleine Sexte.

Als Ursache der Konsonanz ist vielfach die relative Einfachheit der Schwingungszahlenverhältnisse der konsonanten Intervalle angesehen worden; so von Descartes, Leibniz und Euler. Leibniz nannte die Musik geradezu ein verborgenes Rechnen des Geistes, welcher zwar nichts von der Zählung wisse, aber doch das Ergebnis als ein Vergnügen bei den Konsonanzen und als Mißvergnügen bei den Dissonanzen fühle. Daß derartige Hypothesen das Verlangen nach einer positiven Erklärung nicht zu befriedigen vermögen, liegt auf der Hand. Außerdem erheben sich sofort Einwände. Warum bleiben z. B. ganz schwache Verstimmungen von Konsonanzen unbemerkt, während die Zahlenverhältnisse dabei am kompliziertesten sind? Weshalb spricht man nicht auch von Konsonanz und Dissonanz auf dem Gebiete der Farbenempfindungen, wo es doch ebensogut zählbare Schwingungsverhältnisse gibt? Ähnliche Bedenken stehen der Lehre von der unbewußten Wahrnehmung des Schwingungsrhythmus, der periodischen Koinzidenz der Tonimpulse, entgegen, wie sie neuerdings von Opelt, Engel, Polak und am präzisesten formuliert von Th. Lipps[1]) entwickelt worden ist.

Eine exakt wissenschaftliche Begründung der Konsonanz und Dissonanz hat Helmholtz in seiner Lehre von den Tonempfindungen zu geben versucht. Nach ihm beruht die Dissonanz auf einer durch merkbare Schwebungen verursachten Störung im glatten Flusse des Klangeindruckes. „Dissonanz ist eine intermittierende Tonempfindung", und jede „intermittierende Erregung greift unsere Nervenapparate heftiger an als eine gleichmäßig andauernde". Je weniger rauh und unangenehm ein Zweiklang durch Schwebungen von Partial- oder auch Kombinationstönen gemacht wird, um so mehr nähert er sich der Konsonanz, die „eine kontinuierliche

[1]) Psychol. Studien, 1885.

Tonempfindung" ist. Die Konsonanz hängt aber bei Helmholtz auch mit der Klangverwandtschaft zusammen. Zwei Grundtöne sind um so verwandter, je mehr gemeinschaftliche Obertöne sie haben. Im höchsten Maße gilt dies von Grundtönen, die im Oktavenverhältnisse stehen, da in diesem Falle die Teiltöne beider Klänge sich decken. Hierbei sind Obertonschwebungen ganz ausgeschlossen und ist die Konsonanz die größtmögliche. Schreitet man in der Reihe der abnehmenden Konsonanzen, Quinte, Quarte, Terz, fort, so nimmt auch von Stufe zu Stufe die Zahl der koinzidierenden Obertöne ab, während die Möglichkeit von Teiltonschwebungen mehrfach vorhanden ist. Die Verringerung der Konsonanz geht also mit der Verringerung der Verwandtschaft parallel.

Wie die Helmholtzsche Theorie Vorläufer gehabt hat, so ist sie auch nicht ohne Kritiker geblieben. Der hervorragendste und sorgfältigste unter den letzteren ist C. Stumpf[1]). Gegen die Definition, Konsonanz sei eine kontinuierliche, Dissonanz eine intermittierende Tonempfindung, macht er in erster Linie geltend, daß ein Tremolo mit Oktaven oder mit Quinten diese Intervalle in intermittierende, aber nicht in dissonante verwandle. Es gibt also Intermittenzen ohne Dissonanz, ebenso aber auch Dissonanz ohne Schwebungen. So liefert eine Stimmgabel von 500 Schwingungen mit einer von 700 oder diese mit einer von 1000 eine Dissonanz, ohne daß von Schwebungen oder Rauhigkeit etwas zu bemerken wäre. Ein sehr bequemes Mittel, Dissonanz ohne Schwebungen herzustellen, und zwar auch schon bei Ganzton- und Halbtonintervallen, bietet ferner die Verteilung zweier Stimmgabeln an beide Ohren, bei welcher, passende Wahl der Gabeln und des Anschlages vorausgesetzt, die Rauhigkeit verschwindet, die Dissonanz aber bleibt. Endlich ist zu erwähnen, daß Schwebungen auch bei konsonanten Intervallen vorkommen, die trotzdem nicht dissonant werden, und daß wohl die Art der ein und dasselbe Intervall begleitenden Schwebungen, nicht aber der Dissonanzgrad mit der Höhenlage des Intervalles wechselt. Die Schwebungen haben wohl einen Einfluß auf den Grad der Annehmlichkeit, auf die Gefühlswirkung eines Klanges, nicht aber auf die Dissonanz. Auch dem zweiten Merkmal der Konsonanz bei Helmholtz, dem Zusammenfallen der Teiltöne, das überdies nur für gleichzeitige Klänge, nicht für aufeinanderfolgende, in Betracht kommt, muß nach den Darlegungen Stumpfs eine entscheidende Bedeutung abgesprochen werden. Denn hiernach wäre der Konsonanzgrad irgend eines bestimmten Intervalles von der Klangfarbe abhängig, was mit den musikalischen Beobachtungstatsachen nicht vereinbar ist.

Nach der Theorie von A. v. Oettingen[2]) sind verwandt (im ersten Grade) Klänge, welche entweder gleiche Teiltöne haben oder welche Teiltöne eines und desselben Grundtones sind. Im letzteren Falle spricht Oettingen von Tonizität und nennt den gemeinsamen Grundton Tonika; im ersteren Falle spricht er analog von Phonizität und Phonika. Seine Theorie gelangt dann vom Verwandtschaftsbegriff zum Begriff der Konsonanz, die entweder eine tonische oder eine phonische sein kann. Allein auch hier führt die Verwendung der Obertöne zu Widersprüchen mit gewissen Tatsachen, ebenso wie die von H. Riemann aufgestellte und zur Erklärung der Konsonanz herangezogene Untertonlehre sich nicht als stichhaltig erwiesen hat[3]).

Eine wirklich fruchtbare Theorie der Konsonanz und Dissonanz wird definitiv von dem Zurückgreifen auf die Obertöne Abstand nehmen müssen. Während F. Krueger in einer noch nicht vollständig erschienenen Abhandlung[4]), worin er zum Teil an einen älteren Beitrag Preyers[5]) zur Theorie der Konsonanz anknüpft, wenigstens den Differenztönen, welche nach ihm unabhängig von den Obertönen sind, einen wichtigen Einfluß auf die Konsonanz oder Dissonanz eines Intervalles zuschreibt, sucht die Theorie von Stumpf[3]) die Ursache der Konsonanz bzw. Dissonanz in den Empfindungseigentümlichkeiten der Grundtöne selbst

---

[1]) Beiträge zur Akustik u. Musikwissenschaft **1** (1898). (Daselbst zahlreiche weitere, auch auf das Folgende bezügliche Literaturangaben.) — [2]) Harmoniesystem in dualer Entwickelung, 1866. — [3]) Vgl. hierzu Stumpf, Beitr. z. Akustik und Musikwissensch. **1**. — [4]) Differenztöne und Konsonanz, Arch. f. d. ges. Psychologie **1** u. f. — [5]) Akust. Untersuch., S. 44, Jena 1879.

und findet sie in deren größerer oder geringerer Verschmelzung.

Unter Verschmelzung versteht Stumpf den eigentümlichen, graduell abgestuften Charakter der Einheitlichkeit, welcher dem Eindruck zweier gleichzeitiger Tonempfindungen anhaftet. Auch auf dem Gebiete anderer Empfindungen, z. B. des Geruchs und Geschmacks, finde sich ähnliches, am deutlichsten aber innerhalb des Tonsinnes. Die Folge dieses Verhältnisses ist, daß die stärker verschmelzenden Intervalle unter sonst gleichen Umständen immer schwerer analysiert werden, wofür besonders Versuchsreihen an Unmusikalischen Belege bieten. Der Verschmelzungsgrad eines Intervalles geht demjenigen der Konsonanz parallel. Er ist innerhalb des musikalisch in Betracht kommenden Teiles der Tonskala unabhängig von Höhenlage und Stärke der Teiltöne des Intervalles und kommt auch bloß vorgestellten Tönen zu. Die Erklärung der Verschmelzung muß nach Stumpf auf physiologischem Gebiete liegen. Man wird anzunehmen haben, daß beim gleichzeitigen Erklingen oder Vorstellen zweier Töne, deren Schwingungszahlenverhältnis relativ einfach ist, im Gehirn zwei Prozesse stattfinden, die in einer engeren Verknüpfung (einer spezifischen Synergie) zueinander stehen, als wenn weniger einfache Intervallverhältnisse gegeben sind. Worin das Wesen dieser spezifischen Synergie besteht, darüber läßt sich zurzeit freilich noch nichts Näheres sagen.

b) Tonverwandtschaft und Leiterbildung.

Im Gegensatz zu v. Oettingen leitet Stumpf die Verwandtschaft der Töne aus der Konsonanz ab. Direkt verwandt oder verwandt im ersten Grade sind zwei Töne, welche miteinander konsonieren, also in höheren Graden verschmelzen. Indirekt verwandt, und zwar verwandt im zweiten Grade, nennt Stumpf zwei Töne, deren jeder mit einem und demselben dritten Tone konsoniert, z. B. *c* und *h* (durch *g* verwandt) oder *c* und *cis* (durch *a* oder *e* verwandt). Überhaupt sind immer je zwei Töne indirekt verwandt, wenn sie durch einen oder mehrere Töne untereinander derartig verbunden werden können, daß jeder Ton der Reihe mit seinen Nachbarn konsoniert, und zwar ist die Verwandtschaft dabei sovielten Grades, als konsonante Intervalle zwischen dem ersten und letzten Gliede der Reihe liegen.

Wie schon oben hervorgehoben wurde, wird aus der unendlichen Zahl an sich möglicher Tonkombinationen für den musikalischen Gebrauch eine relativ kleine Anzahl fester Stufen als allein verwendbar ausgeschieden. Die Veranlassung hierzu ist die Tonverwandtschaft; sie ist die psychologische Grundlage für die Existenz und den Aufbau der Tonleitern. In der diatonischen *C-Dur*-Leiter *c d e f g a h c*^{1} sind, wie man leicht sieht, alle Töne entweder direkt oder indirekt mit der Tonika *c* verwandt. So gelangt man beispielsweise von *c* zu *c*^{1} oder *g* direkt, zu *d* durch einen Quintenschritt aufwärts und einen Quartschritt abwärts oder durch zwei Quintenschritte (bis *d*^{1}) aufwärts und einen Oktavenschritt abwärts. In beiden Fällen erhalten wir für *d* dieselbe Tonhöhe, da das eine

	C	*Cis*	*D*	*Des*	*D*	*Dis*	*E*	*Es*	*F*	*Fes*	*Eis*	*Fis*	*Fis*	*G*	*Ges*	*Gis*	*A*	*As*	*A*	*Ais*	*B*	*B*	*H*	*Ces*	*His*
—		$\frac{T}{t}$		$\frac{g}{T}$	$\frac{g}{t}$	$\frac{TT}{g}$	T	t	q	$\frac{s}{T}$	$\frac{TT}{t}$	$\frac{S}{t}$	$\frac{QT}{g}$	Q	tt	TT	S	s	S	$\frac{ST}{t}$	qq	Qt	QT	st	TTT
1		$\frac{25}{24}$		$\frac{16}{15}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{75}{64}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{32}{25}$	$\frac{125}{96}$	$\frac{25}{18}$	$\frac{45}{32}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{36}{25}$	$\frac{25}{16}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{125}{72}$	$\frac{16}{9}$	$\frac{9}{5}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{48}{25}$	$\frac{125}{64}$

Mal (c gleich 132 Schwingungen gesetzt, was dem Kammerton 440 entsprechen würde) $d = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot 132 = \frac{9}{8} \cdot 132$, das andere Mal $d = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 132 = \frac{9}{8} \cdot 132$ ist. Gehen wir dagegen von c eine Quarte aufwärts und eine kleine Terz abwärts, so bekommen wir ein anderes $d = \frac{4}{3} \cdot \frac{5}{6} \cdot 132 = \frac{10}{9} \cdot c$. Ebenso resultiert ein anderes e durch den natürlichen Terzschritt 5 : 4, als wenn wir von c aus vier Quinten aufwärts und zwei Oktaven abwärts schreiten (pythagoreische Terz). Zwei große Terzschritte von c aus führen uns zu einem zwischen g und a gelegenen Tone *gis*; ein großer Terzschritt aufwärts, ein kleiner Terzschritt wieder abwärts zu *cis*; ein Quartschritt vorwärts und ein großer Terzschritt zurück zu *des*; ein kleiner Terzschritt vorwärts zu *es*. So entwickelt sich schließlich die auf voriger Seite stehende Leiter[1]). Man kann sie, um dem Bedürfnis nach einem kurzen Ausdruck zu genügen, als enharmonische Leiter bezeichnen. Sie enthält vor allem (fettgedruckt) die Töne der diatonischen Dur- und Mollleiter, wie sie aus den Dreiklängen mit großen und mit kleinen Terzen auf *C*, *F* und *G* resultieren. Von Alterationen (Erhöhungen und Vertiefungen) sind nur solche aufgenommen, welche in der Musik durch ein einfaches ♯ oder ♭ ausgedrückt werden. Die Wahl der Töne gründet sich auf bestimmte in der Praxis wurzelnde Überlegungen. Natürlich wären an sich noch mehr und andere Töne innerhalb der Oktave von c aus zu gewinnen gewesen, und man kommt jedenfalls zu solchen, wenn man einen anderen Ton der Leiter als c zur Tonika und zum Ausgangston einer neuen Leiter wählt.

Den zahlreichen musikalischen Intervallen, in welche sich die Oktave theoretisch nach diesem oder einem anderen Prinzip einteilen läßt, kann man praktisch wohl bis zu einem gewissen Grade bei Benutzung solcher Instrumente gerecht werden, welche, wie die menschliche Stimme oder die Geige, keine konstanten Tonhöhen haben. Bei dem Klavier, dem Harmonium, der Orgel, überhaupt bei allen Instrumenten mit festen Tönen würde man aber zu diesem Zwecke eine verwirrende Menge einzelner Töne nötig haben. Um diesem Übelstande zu entgehen, hat man seit lange zu dem Auskunftsmittel gegriffen, alle nur wenig verschiedenen Töne, wie beispielsweise *cis* und *des*, zusammenzulegen und sog. temperierte Leitern zu bilden. So ist die Oktavenskala unseres Klaviers eine zwölfstufige gleichschwebend temperierte. Sie heißt gleichschwebend, weil alle Intervalle zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Tönen gleich groß, nämlich $1 : \sqrt[12]{2}$, sind. Unter ungleichschwebenden Temperaturen versteht man solche, bei denen einige besonders wichtige Intervalle mathematisch rein und nur die übrigen gegeneinander abgeglichen sind. Bei diesen ist aber dafür die Abweichung von der Reinheit um so größer und störender. An den Grenzen der Wahrnehmbarkeit liegen die Unreinheiten bei der von Mercator vorgeschlagenen, von Bosanquet[2]) an seinem Harmonium praktisch ausgeführten 53stufigen gleichschwebenden Temperatur.

c) Intervallsinn und absolutes Tonbewußtsein.

Die zwölfstufige gleichschwebende Temperatur ist gegenwärtig allgemein üblich. In dieser Stimmung sind freilich die großen Terzen etwas zu groß, die kleinen zu klein; auch die Quinten sind ein wenig zu klein, obgleich die Differenz hier geringer ist. Aber es trifft sich günstig, daß eine gewisse psychologische Eigentümlichkeit hinsichtlich des Intervallurteils besteht, die uns die Abweichung der Terzen weniger fühlbar macht.

Beobachtungen über die Empfindlichkeit des Ohres gegen die Unreinheit von Intervallen sind seit Delezenne (1827) von Cornu und Mercadier, von Preyer,

---

[1]) Vgl. C. Stumpf und K. L. Schaefer, Tontabellen; Stumpfs Beiträge zur Akustik und Musikwissensch. 3 (1901). — [2]) An Elementary Treatise on Musical Intervalls and Temperament, London, Macmillan, 1875.

Schischmánow u. a. veröffentlicht worden. Die Ergebnisse weichen indes zum Teil sehr voneinander ab, zum Teil beruhen sie auf unzuverlässiger Basis, wie aus den kritischen Erwägungen von Stumpf und Meyer[1]) hervorgeht. Die Letztgenannten haben den Gegenstand aufs neue untersucht und sind dabei zu folgenden Resultaten gelangt. Die früher so gut wie allgemein angenommene Regel, Abweichungen von der Reinheit eines Intervalles seien um so merklicher, je vollkommener die Konsonanz, ist nicht richtig. Der kleinen Terz gegenüber zeigte sich die Neigung, das physikalisch reine Intervall etwas zu hoch zu schätzen; subjektiv rein erschien die kleine Terz erst bei einer Verkleinerung der Tondistanz von etwa $1^1/_2$ Schwingungen. Dagegen trat bei der großen Terz, noch mehr bei der Quinte und am meisten bei der Oktave die Tendenz zu einer Vergrößerung zutage. Die subjektiv reine große Terz übertraf die objektive um 0,43 Schwingungen im Mittel, und für Quinte und Oktave ergaben sich als entsprechende Werte + 0,81 und + 0,95. Gleich große Abweichungen von der subjektiven Reinheit wurden bei diesen drei Intervallen mit gleicher Sicherheit beurteilt. Alle diese Angaben beziehen sich auf mittlere Tonlagen und aufeinanderfolgende Töne. Die Intervalle gleichzeitiger Töne werden viel schlechter geschätzt. Als das Kriterium für die Beurteilung eines Intervalles bezüglich seiner Reinheit oder Unreinheit betrachtet Stumpf ein angeborenes und der individuellen Entwickelung fähiges eigenes Reinheitsgefühl, das sich bei Vergrößerungen als eine Art Spannung, Schärfe, Überreizung, bei Verkleinerungen als Mattigkeit oder Schalheit äußert.

Die Fähigkeit, ein gegebenes Intervall richtig zu benennen oder ein verlangtes zu singen, ist ziemlich verbreitet und jedem musikalisch Veranlagten eigen. Seltener dagegen ist jene Begabung, welche man mit dem Ausdruck absolutes Gehör oder absolutes Tonbewußtsein bezeichnet und welche erst in neuerer Zeit bei den Autoren das wohlverdiente Interesse in größerem Maße gefunden hat[2]). Sie besteht in dem Vermögen, einen ohne Verbindung mit anderen gehörten Ton mit dem für ihn gebräuchlichen Buchstaben zu benennen, und anderseits einen Ton, dessen Buchstabenbezeichnung angegeben wird, aus dem Gedächtnis durch Singen oder Pfeifen zu produzieren. Manchen Personen sind beide Fähigkeiten zugleich eigen. Viele aber besitzen nur die erstere, andere nur die zweite. In dem einen Falle handelt es sich um die Reproduktion der Wortvorstellung durch die Tonempfindung, und zwar taucht die Wortvorstellung unmittelbar auf, nicht etwa erst infolge einer wissentlichen Vergleichung mit irgend einem Tonerinnerungsbilde. In dem anderen Falle löst die Wortvorstellung die Tonvorstellung aus, jedoch nach den Angaben von Abraham nicht direkt, sondern auf einem Umwege über vermittelnde Vorstellungen. Die Erkennbarkeit der absoluten Tonhöhe erstreckt sich bei einigen über die ganze musikalische Region des Tonreiches, wobei allerdings Täuschungen bezüglich der Oktave, welcher der richtig benannte Ton angehört, vorkommen. Bei anderen beschränkt sich das absolute Tonbewußtsein auf wenige Oktaven oder gar auf einzelne Töne, worunter dann häufig der Kammerton ist. Individuen der letzteren Gattung erkennen die Höhe eines gehörten Tones oft von dem ihnen geläufigen aus mit Hilfe des Intervallsinnes. Was den Einfluß der Tonintensität auf die absolute Tonbeurteilung anlangt, so hat Abraham gefunden, daß es ein Stärkeoptimum gibt, welches zwischen dem Stärkemaximum und -minimum, aber diesem beträchtlich näher liegt; eine besondere Dauer des Tones erwies sich als nicht erforderlich für das Höhenurteil, die Dauerschwelle ist vielmehr dieselbe wie für die Tonwahrnehmung überhaupt. Von ganz hervorragendem Einfluß ist die Klangfarbe, wie schon v. Kries betonte. Viele Musiker können nur die Töne bestimmter Instrumente mit voller Sicherheit sofort benennen, während ihr absolutes Tongedächtnis anderen gegenüber völlig versagt. Das am leichtesten zu beurteilende Instrument scheint das Klavier zu sein; Stimmgabeln, gesungene Töne,

---

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **18**, 321, 1898. — [2]) Literatur: Stumpf, Tonpsychologie; v. Kries, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **3**, 257, 1892; Naubert, Das absolute Tonbewußtsein, Der Klavierlehrer 1898; M. Meyer, Psychol. Review **6**, 1899; O. Abraham, Das absolute Tonbewußtsein, Sammelbände d. Internat. Musikgesellsch. **3**, 1901/02.

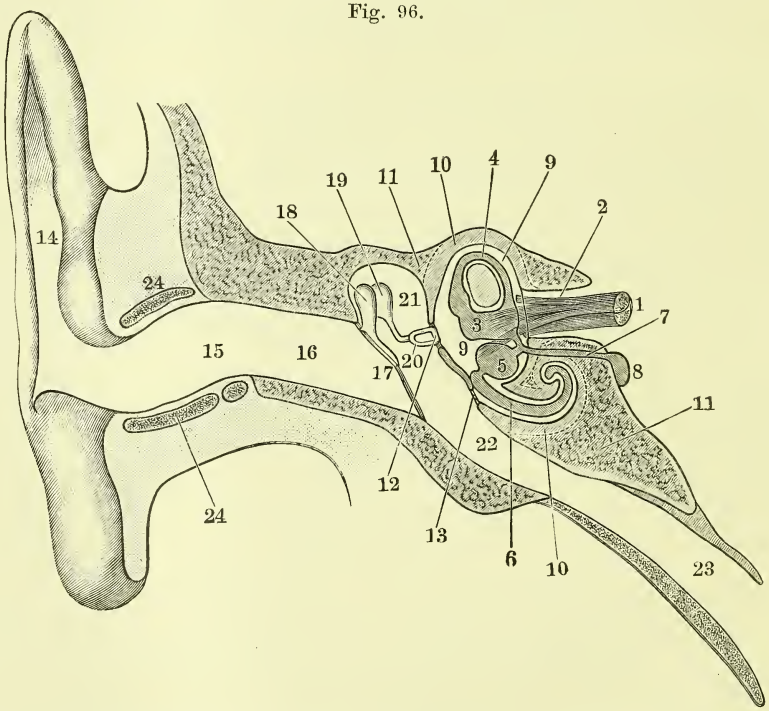
Glocken und Gläser bieten am meisten Schwierigkeiten. Offenbar hängt dies mit der Zahl und der Stärke der Teiltöne des jeweils zu erkennenden Klanges zusammen, wenn auch die Beziehungen im einzelnen noch nicht ganz klar sind. Möglicherweise beurteilt man nicht den Grundton für sich, sondern in Gemeinschaft mit seinen nächsten, mit ihm ein Ganzes bildenden, Obertönen. — Das absolute Tonbewußtsein wird zumeist von seinem Besitzer schon in der Kindheit als vorhanden erkannt. Seine Erlernbarkeit scheint nur gering zu sein.

V. Spezielle Physiologie des Gehörorgans.

a) Anatomische Vorbemerkungen.

Das Gehörorgan zerfällt in drei Teile, das äußere Ohr, welches die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang umfaßt, das Mittelohr, das auch Trommelhöhle oder Paukenhöhle *(Cavum tympani)* genannt wird, und das im Felsenbein gelegene innere Ohr oder Labyrinth. Das Mittelohr ist gegen das äußere durch das trichterförmig eingezogene Trommelfell, gegen das innere durch die knöcherne Wandung des letzteren, bzw. die darin gelegenen Fenster abgegrenzt; es ist eine lufthaltige, mit dem Nasen-Rachenraum durch die Ohrtrompete *(Tuba Eustachii)* kommunizierende Höhle, durch die sich quer hin-

Fig. 96.



durch vom Trommelfell zum ovalen Fenster die Gehörknöchelchenkette spannt. Das Labyrinth ist ein mit Flüssigkeit, Lymphe, gefüllter Raum, dessen mittlerer Teil der Vorhof *(Vestibulum)* heißt. Aus diesem gehen nach hinten gerichtet die drei sogenannten Bogengänge hervor, nach vorn der Schneckenkanal, der in $2^3/_4$ Spiralwindungen um seine Achse gewickelt ist.

Fig. 96 gibt eine schematische Darstellung dieser Verhältnisse. Darin ist 1 der Hörnerv, welcher durch den inneren Gehörgang (2) zum Labyrinth tritt, 3 der *Utriculus,* welcher mit dem *Sacculus* (5) zusammen im Vorhof liegt, 4

einer der drei Bogengänge, 6 die häutige Schnecke *(Ductus cochlearis)*, 7 der *Ductus endolymphaticus*, 8 der *Saccus endolymphaticus*, 9 der perilymphatische Raum, 10 das knöcherne Labyrinth, 11 das Felsenbein, 12 die *Fenestra ovalis*, in der mittels seines Ringbandes der Steigbügel beweglich befestigt ist, 13 die durch eine *Membrana tympani secundaria* geschlossene *Fenestra rotunda*, 14 die Ohrmuschel, 15 und 16 der knorpelige (24) und knöcherne Teil des äußeren Gehörganges, 17 das Trommelfell, 18 der Hammer *(Malleus)*, 19 der Amboß *(Incus)*, 20 der Steigbügel *(Stapes)*, 21 bis 23 die Pauke nebst Tube. Fig. 97 zeigt die Ohrmuschel und ihre einzelnen Teile im Profil gesehen. Die mit dem Stern versehene Stelle ist das *Tuberculum supratragicum*.

Fig. 97.

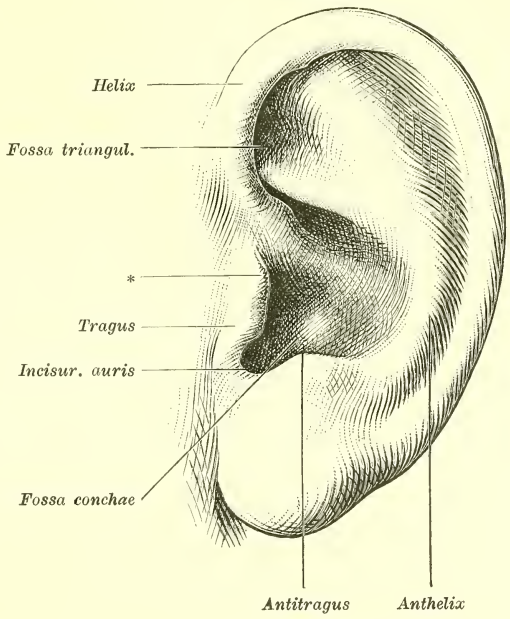


Fig. 98 gibt den Zusammenhang der drei Gehörknöchelchen untereinander wieder. Der Stiel des Hammers (das *Manubrium*) ist mit dem Trommelfell verwachsen. Sein langer Fortsatz *(Proc. longus s. anterior s. folianus)* ist beim Erwachsenen meist in ein Ligament verwandelt und dient zur Befestigung des Knöchelchens *(Lig. anterius)*. Außer diesem vorderen Ligament besitzt der Hammer noch ein nach hinten gerichtetes *(Lig. posterius)*, das mit ersterem zusammen einen mäßig gespannten,

Fig. 98.

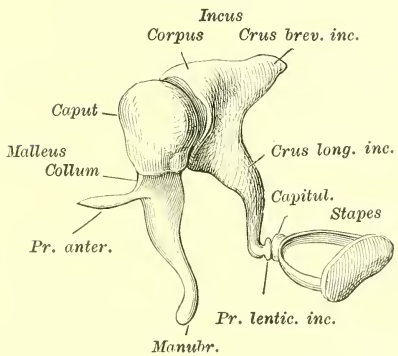
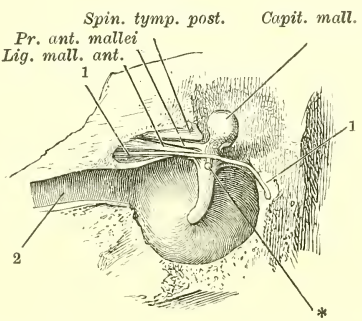


Fig. 99.



am Hals des Hammers inserierenden Sehnenstrang bildet, um den sich der Hammer wie um eine Achse drehen kann (Achsenband), ferner ein gerade nach außen gegen den oberen knöchernen Rand des Trommelfells ziehendes *Lig. externum* und ein *Lig. superius*, dessen Fasern sich nach Helmholtz vom langen Fortsatz aus nach oben in eine schmale Spalte begeben, die, wie Fig. 99 erkennen läßt, zwischen Hammerkopf und Paukenhöhlenwand bleibt. Der kurze Fortsatz des durch ein eigentümliches Gelenk mit dem Hammerkopfe verbundenen Amboßkörpers stützt sich mit seiner überknorpelten Spitze auf eine Hervorragung der hinteren Wand der Paukenhöhle. Dieses Amboß-Paukengelenk ist eine Amphiarthrose und wird von manchen nur als Bandverbindung angesehen. Der Steigbügel fügt sich

mit seinem *Capitulum* mittels einer Gelenkverbindung an den *Processus lenticularis (Ossiculum Sylvii)* des Amboßstieles an.

Fig. 99 (a. v. S.) zeigt das Trommelfell nebst Hammer von innen betrachtet. 1 ist die durch die Paukenhöhle gehende *Chorda tympani*, ein den *Nervus facialis* mit dem *Nervus lingualis* verbindender Nervenstrang, 2 ist die Tube. An der durch einen Stern gekennzeichneten Stelle setzt sich die Sehne des Trommelfellspanners an den Hammer an.

Der Verlauf des Trommelfellspanners, *Musc. tens. tymp.*, geht aus Fig. 100 hervor. Der Muskelbauch ist durch das Septum (2) von der Tube (3) getrennt; seine Sehne durchsetzt die Paukenhöhle. Im übrigen sieht man in der Figur 100 wieder die Chorda (1), den Hammer, den Amboß und das Trommelfell (4), dessen nach innen gerichtete Trichterspitze, der Nabel, dem unteren Ende des Hammers entspricht (siehe die gesternte Stelle).

Fig. 100.

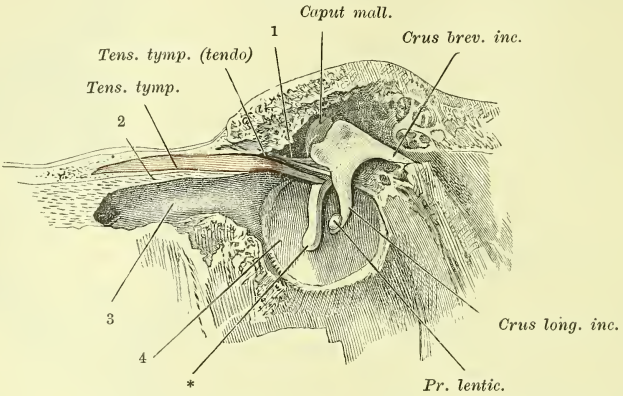
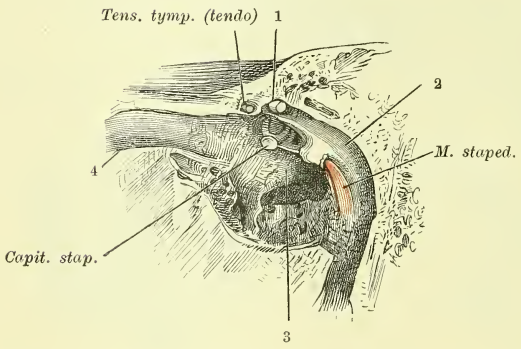


Fig. 101.



Die Tensorsehne ist (abgeschnitten) auch in Fig. 101 sichtbar, die hauptsächlich den Steigbügelmuskel, den *Stapedius*, darstellen soll. Derselbe entspringt im Grunde der (geöffnet abgebildeten) *Eminentia stapedii* und sendet durch die Öffnung an der Spitze derselben seine dünne Sehne zum Köpfchen des *Stapes* bzw. zum Amboß-Steigbügel-Gelenk. Ferner ist in der Figur der Steigbügel selbst, der Stumpf des *Nervus facialis* (1), der Facialiskanal (2), das sog. Promontorium (3), eine Vorwölbung der Paukenhöhlenwand, und die Tube (4) zu sehen.

Der dem Mittelohr zunächst gelegene Teil der Tube ist knöchern, die Fortsetzung bis zur Rachenmündung knorpelig. Die eigentümlich rinnenförmige bzw. auf dem Querschnitt hakenförmige Gestalt des nur eine Wand der Tube bildenden Knorpels veranschaulichen die Fig. 102 und 103. In ersterer, einer Abbildung der Schädelbasis, ist der Knorpel durch einen Stern markiert. Er beginnt in der Gegend der *Spina angularis* und setzt, wie die Betrachtung der Lage des äußeren Gehöreinganges zeigt, im ganzen die Richtung des Paukenhöhlenlumens fort. Fig. 103 A ist ein Tubenquerschnitt dicht vor der Verbindung des knorpeligen Teiles mit dem knöchernen, B ein Querschnitt am vorderen Rande der *Spina angularis*, C ein solcher in der Gegend des *Foramen ovale*. Die Sterne bedeuten den

Fig. 102.

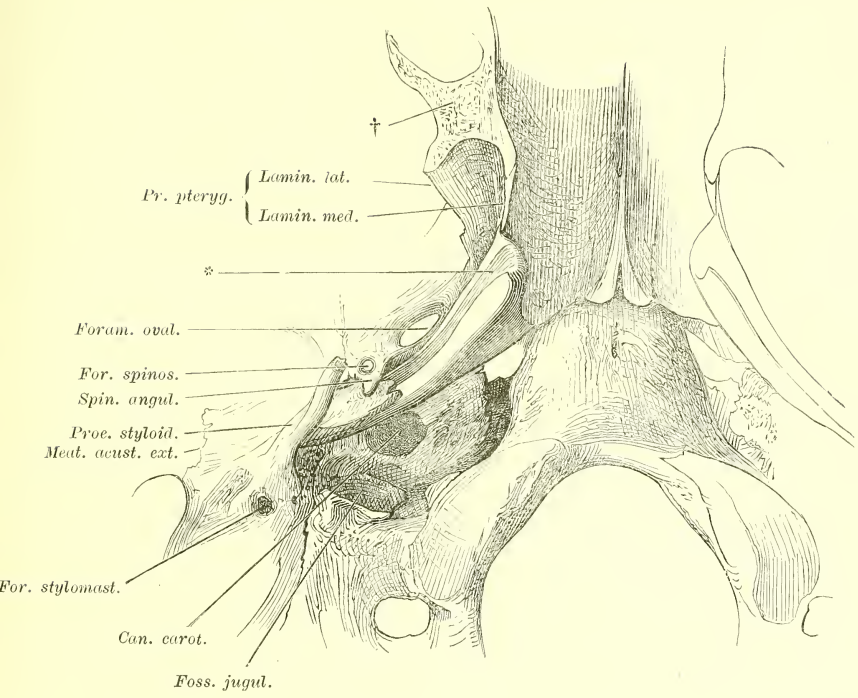
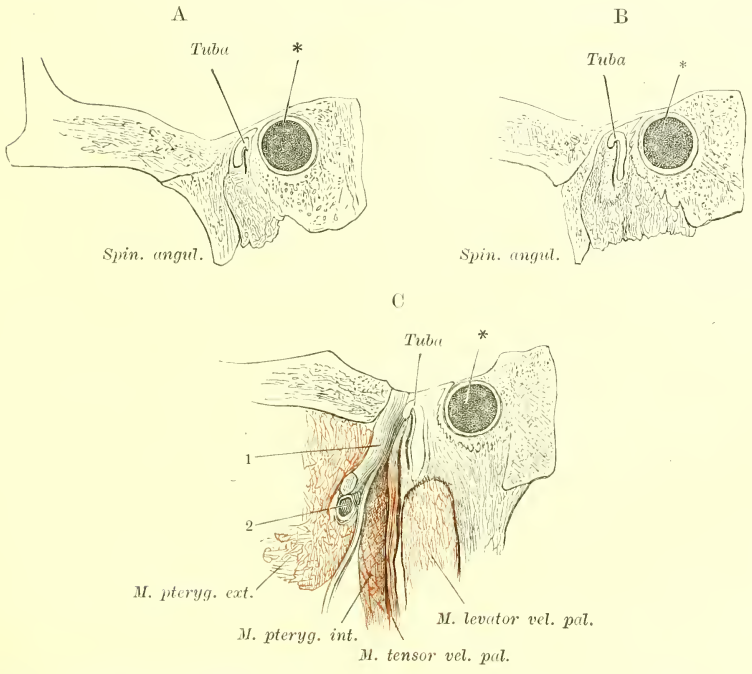


Fig. 103.



Durchschnitt der *Arteria carotis*, 1 ist der *Nervus inframaxillaris*, 2 die *Arteria meningea media*. Das spaltförmige Lumen der Tube kann erweitert, die Tube geöffnet werden, wenn der *Musculus tensor veli palatini s. sphenostaphylinus*, dessen Fasern sich an die äußere Fläche des umgebogenen Teiles anheften, eine Kontraktion vollführt, wie das beim Schlingen der Fall ist. Politzer ist auf Grund von Trigeminusreizungen, Tröltsch auf Grund anatomischer Studien für diese Wirkung des *Tensor veli* eingetreten. Hensen[1]) findet dagegen in Übereinstimmung mit älteren Angaben von Henle und Rüdinger die Funktion des Muskels als Tubeneröffner fraglich und macht darauf aufmerksam, daß bei den kaltblütigen Wirbeltieren die Tuben weit offen ständen und daher ein ausgeprägter Muskelmechanismus aus phylogenetischen Gründen nicht zu erwarten sei.

Einen Durchschnitt durch den Schneckenkanal und seine Achse (Spindel, Modiolus) zeigt in dreifacher Vergrößerung Fig. 104. Von der Basis her tritt der *Nervus cochlearis* — der andere Teil des *Nervus acusticus* geht als *Ramus vestibularis* zu Vorhof und Bogengängen — in die Spindel und weiter in die Scheidewand, die durch die ganze Länge des Kanals diesen in zwei Treppen, *Scala vestibuli* und *Scala tympani*, teilt. Der der Spindel zugekehrte Teil dieser Scheidewand ist knöchern *(Lamina spiralis)*. Die Lamina erhebt sich nur bis etwa zur Mitte des Kanals. Von ihrer freien Kante aus gehen divergierend zwei Membranen, von denen die eine die direkte Fortsetzung der Lamina bildet. Es ist dies die Basilarmembran, auf der die Endausbreitung des

Fig. 104.

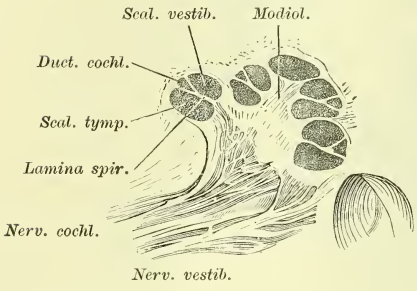
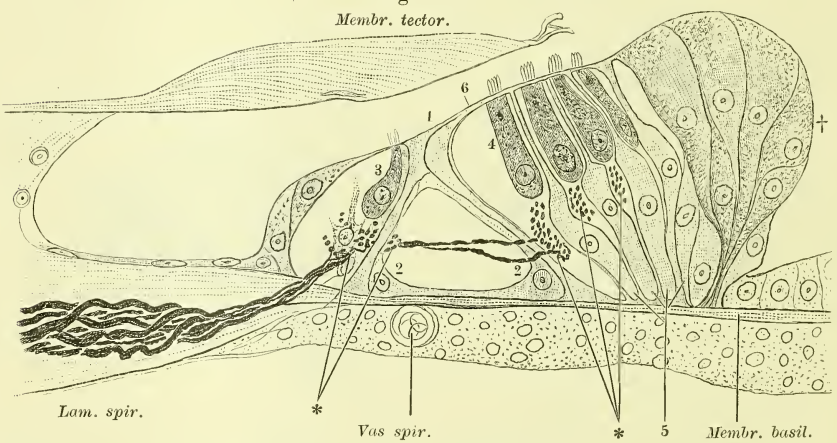


Fig. 105.



Hörnerven, das Cortische Organ, aufgelagert ist. Die andere Membran heißt die Reissnersche oder Vestibularmembran. Beide umschließen zusammen mit einem Teil der Kuppel des Kanals einen im Querschnitt dreiseitigen, durch die Schnecke sich hinwindenden Raum, den *Ductus cochlearis*. Das ovale Fenster sieht in die *Scala vestibuli*, das runde ist das untere Ende der *Scala tympani*. Beide Treppen sind in der ganzen Länge des Schneckenkanals durch den *Ductus cochlearis* getrennt. Nur in der Schneckenspitze, wo die *Lamina spiralis* in Form eines freien, scharfen Hakens (Hamulus) endigt, findet eine Kommunikation statt (Helicotrema).

Fig. 105 zeigt einen senkrecht zur Basilarmembran geführten Querschnitt des akustischen Endapparates. Oben ist die *Scala vestibuli*, unterhalb der Basilar-

[1]) Vgl. hierzu Hermanns Handb. d. Physiol. 3 (2), 58 u. 59, 1880.

membran die *Scala tympani* ergänzt zu denken. Bei 1 stoßen die beiden Cortischen Pfeiler aneinander, die zusammen den, einen Tunnelraum umschließenden, Cortischen Bogen bilden. Am Grunde desselben liegen (bei 2) die Bodenzellen. 3 und 4 sind die mit Haaren versehenen Hörzellen (Haarzellen, Deckzellen), deren äußere (4) auch Cortische Zellen heißen. Unter ihnen liegen (5) Stützzellen, auch Deitersche Zellen genannt. Außer letzteren dient zur Fixierung der Hörzellen die *Membrana reticularis* (6), die von den oberen Enden der Pfeiler ausgeht und in kreisrunden Öffnungen die Cilien tragenden Enden der Hörzellen aufnimmt. Über die Oberfläche des ganzen Zellkomplexes legt sich die *Membrana tectoria* (Cortische Membran). Bei † befinden sich wulstartig erhobene Epithelzellen (Hensensche Zellen). Links ziehen (schwarz dargestellt) durch die Lamina die Nervenfasern heran und zu den Hörzellen hin; an den mit Sternen gekennzeichneten Stellen sind Querschnitte der spiralig verlaufenden Nervenfasern zu sehen.

b) Die Funktion des äußeren Ohres.

Die Ohrmuschel und der äußere Gehörgang des Menschen sind Organe, denen eine umfassende und fundamentale Bedeutung für das Hören jedenfalls nicht zukommt. Dafür sprechen zunächst physiologische und pathologische Beobachtungen. Verstopft man die Gehörgangsöffnung möglichst fest, so werden freilich die durch die Luft geleiteten tieferen Töne stark geschwächt oder unhörbar gemacht, die höheren jedoch in um so geringerem Grade beeinträchtigt, je größer ihre Schwingungszahl ist. Für die Perzeption sehr hoher Töne ist es ziemlich gleich, ob das Ohr offen oder geschlossen ist, und für die tieferen ebenfalls, insoweit sie durch die Kopfknochen direkt dem Labyrinth zugeführt werden. Ist bei sonst intaktem Gehör die Ohrmuschel vollständig verloren gegangen, so ist anfangs das Hören merklich verschlechtert, der Mangel wird aber bald durch die Erlernung zweckmäßiger Kopfdrehungen ausgeglichen. Die bei angeborenem Fehlen des äußeren Ohres zu beobachtende Taubheit wird meist durch gleichzeitige innere Krankheitsprozesse bedingt.

Die Fische, die Amphibien und vor allem die Vögel, welche letztere doch unbestreitbar hören, haben überhaupt keine Ohrmuschel, wenn man von vereinzelten Ausnahmen absieht. Dagegen besitzen die Säugetiere bis auf gewisse im Wasser oder in der Erde lebende Arten, wie Walroß, Schnabeltier, Maulwurf und einige andere, im allgemeinen eine Ohrmuschel und zwar vielfach eine solche von tütenähnlicher Gestalt und elliptischer Form, die sich mit Hilfe zahlreicher Muskeln nach den verschiedensten Richtungen wenden, erweitern, verengern, verlängern und verkürzen läßt. Betrachtet man beispielsweise beim Pferde, dem 17 Muskeln zur Bewegung der Ohrmuschel zur Verfügung stehen, das lebhafte Spielen der letzteren, so wird man kaum zweifeln können, daß dieselbe geeignet ist, wie eine Art Hörrohr den Schall zu sammeln und auch zur Bestimmung der Schallrichtung zu dienen, indem sie so lange gedreht wird, bis ihre Öffnung der Schallquelle zugewendet und damit das Maximum der Hörstärke erreicht ist.

Die menschliche Ohrmuschel werden wir aber wohl mit Darwin als ein im Verlaufe der phylogenetischen Entwickelung verkümmertes Organ aufzufassen haben. Ihre Bildung erscheint zum Auffangen und Hineinleiten des Schalles in den Gehörgang nicht sonderlich zweckmäßig und die Beweglichkeit ist fast ganz verloren gegangen. Nur wenige Personen sind imstande, das Ohr sichtbar und ohne Mitbewegung der Kopfhaut nach vorn, oben oder

hinten zu richten, und noch viel seltener ist die Fähigkeit, beide Ohren zugleich und auf verschiedene Weise zu bewegen. In dem Spannungsgefühl, das die meisten in der Gegend des äußeren Ohres beim Lauschen empfinden, verrät sich dem Anschein nach noch eine gewisse Tendenz zu Ohrmuschelbewegungen; im allgemeinen indessen ist der Mensch darauf angewiesen, durch eine entsprechende Wendung des Kopfes gegen die Schallquelle das Optimum der Perzeption aufzusuchen, wenn eine Verstärkung der Schallwahrnehmung oder die genauere Richtungsbestimmung wünschenswert ist.

Unter diesen Umständen fragt es sich, ob unsere Ohrmuschel denn überhaupt einen irgendwie erheblichen Nutzen für das Hören hat. Viele, namentlich ältere, Autoren haben den äußeren Ohrknorpel als Reflektor aufgefaßt. So meinte Johannes Müller [1]), als solcher käme vorzüglich die Concha in Betracht, indem sie die aus der Luft auftreffenden Schallwellen gegen den Tragus werfe, der sie seinerseits in den Gehörgang reflektiere. Mach [2]) hat aber (zum Teil in Gemeinschaft mit A. Fischer [3]) Beweise dafür erbracht, daß hier von einer regelmäßigen Reflexion keine Rede sein kann. Eine reguläre Reflexion oder Brechung einer Wellenbewegung findet nur dann an einer Fläche statt, wenn die linearen Dimensionen der letzteren enorm groß gegenüber der Wellenlänge sind. Bei den Ätherschwingungen des Lichtes ist diese Bedingung jederzeit leicht erfüllbar; zwischen dem Flächeninhalte der Ohrmuschel und den Schallwellen, zumal der tieferen Töne, besteht aber vielmehr das umgekehrte Verhältnis.

Wenn wir während der Beobachtung eines von vorn kommenden leisen Schalles die leicht gekrümmten Hände von hinten gegen die Ohrmuscheln legen, so daß diese dadurch gleichsam vergrößert werden, wird der Schall alsbald merklich lauter. Ist nun auch diese Erscheinung nach den Untersuchungen Machs nicht durch Reflexion zu erklären, so steht doch ihre Tatsächlichkeit fest. Die eben beschriebene Wirkung der Hände müssen dann aber auch schon die Ohrmuscheln allein haben, obwohl freilich in verhältnismäßig geringerem Grade. In der Tat ist von mehreren Seiten [4]) angegeben, daß sich bei einzelnen Schwerhörigen eine deutliche Besserung der Hörweite nachweisen lasse, wenn die Muschel durch den hinten andrückenden Finger vorwärts geschoben würde, und daß überhaupt ihr Anheftungswinkel nicht ganz gleichgültig sei. In demselben Sinne sprechen die folgenden physiologischen Versuche. Schneider [5]) füllte seine linke Ohrmuschel mit einer Mischung von Wachs und Öl aus, so daß nur eine der Weite des äußeren Gehörgangs entsprechende Öffnung blieb. Dann wurden gerade von vorn oder hinten kommende Töne links schwächer gehört und demgemäß etwas nach rechts lokalisiert. Waren beide Ohren in der genannten Weise behandelt, so zeigte sich das Schlechterhören noch ausgesprochener, und am auffallendsten ward es, wenn auch noch der Raum zwischen Ohr und Hinterkopf beiderseits ausgefüllt wurde. Küpper [6]) fand bei völliger Verklebung der Muschel und Einführung eines Glas- oder Hörrohres in den Gehörgang

[1]) Handbuch d. Physiol. d. Menschen 2, 452, Koblenz 1840. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. 9, 72, 1875. — [3]) Pogg. Ann. 149, 421, 1873. — [4]) Vgl. O. Wolf, Sprache und Ohr, S. 185, Braunschweig 1871; Buchanan, Meckels Arch. f. Anat. u. Physiol. 1828. — [5]) Die Ohrmuschel und ihre Bedeutung beim Gehör, Dissert. Marburg 1855. — [6]) Arch. f. Ohrenheilk. 8, 158, 1874.

ebenfalls eine Verringerung der Hörschärfe, während Harless [1]) eine solche bei einer ähnlichen, allerdings wenig zweckmäßigen Anordnung vermißt hatte. In der von Rinne [2]) ausgeführten Versuchsreihe, wobei eine Uhr als Schallquelle diente und der Ohrknorpel mit Brotteig bedeckt war, erwies sich der Einfluß der Muschel auf die Präzision des Gehörs ganz deutlich, und auch Kessel [3]) tritt für einen solchen ein, nachdem er sich überzeugt, daß die Hörweite in der Medianebene nach vorn ab- und nach hinten zunimmt, wenn man die Ohrmuschel an den Kopf preßt, also ihre Schirmwirkung verringert, daß die Hörweite dagegen bei normalem Abstehen der Ohren vom Kopfe nach vorn größer ist als nach hinten und daß endlich dieser Unterschied völlig verschwindet, wenn man den Eingang ins Ohr durch Einstecken einer Röhre in den Gehörgang aus dem Bereich der Muschel hinaus in den Raum verlegt.

Müller, Harless, Schneider u. a. haben die Auffassung vertreten, daß der Ohrknorpel zwar einen Teil der aus der Luft auftreffenden Schallwellen zurückwerfe, einen nennenswerten Teil aber auch aufnehme und zum Trommelfell weiter leite. Wieweit diese Ansicht zutrifft, wird sich kaum bestimmen lassen. So viel ist allerdings sicher, daß der Knorpel direkt auf ihn übertragene Schallwellen besser leitet als der Schädel. J. Müller machte diese Beobachtung mit Hilfe einer Pfeife, und ich kann dieselbe nach Stimmgabelversuchen nur bestätigen. Wenn eine fest gegen den Warzenfortsatz gedrückte a^1-Gabel an dieser Stelle abgeklungen ist, wird sie meist noch wieder hörbar beim Aufsetzen auf irgend einen Punkt der Ohrmuschel; besonders bevorzugt ist in dieser Beziehung der Tragus und namentlich dessen Vorderfläche: hier kann man die Gabel oft noch mehrmals abheben und wieder aufsetzen, ehe sie im letzteren Falle tonlos gefunden wird.

Einige Autoren haben Wert darauf gelegt, daß gewisse Partien der Ohrmuschel gewissen Tönen gegenüber als Resonatoren wirken. So fand Ch. H. Burnett in Philadelphia [4]), daß *Helix* und *Fossa helicis* am meisten auf tiefe Töne reagierten, *Anthelix* und *Fossa anthelicis* auf mittlere und die *Concha* auf hohe. Ich meine, daß es sich hierbei um accidentelle Verhältnisse handelt, denen keinerlei erhebliche physiologische Bedeutung zukommt. Wenn Burnett, wie es nach dem mir allein zugänglichen Referat seiner Arbeit scheint, diesen Dingen einen wesentlichen Einfluß auf die Klanganalyse zuschreibt, so ist das jedenfalls übertrieben.

Wichtiger ist, daß der Gehörgang bestimmte Töne durch Resonanz zu verstärken vermag. Bei der relativen Kürze desselben kommen natürlich nur höhere Töne in Betracht. Nach Rinne liegt der Eigenton des Gehörganges in der Gegend des f^4. Helmholtz fand für sein rechtes Ohr ebenfalls f^4, für das linke c^4; Hensen bei sich selbst rechts d^4, links a^4 und bei einer Frau rechts f^4, links g^4; Kiesselbach [5]) links a^4, rechts h^4. Durch Eintreiben von Luft in die Paukenhöhle oder auch durch Anspannung des Trommelfelles kann der Resonanzton um eine große Terz bis Sexte vertieft werden.

---

[1]) Wagners Handwörterbuch d. Physiol. **4**, 350, 1853. — [2]) Zeitschr. f. rationelle Medizin (3), **24**, 12, 1865. — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 123, 1882. — [4]) Referat seiner Publikation im Arch. f. Ohrenheilk. **9**, 127, 1875. — [5]) Pflügers Arch. **31**, 95 und 377.

c) Die Funktion des Mittelohres.

Die Physiologie des Mittelohres hat die Mechanik des Trommelfells und der Gehörknöchelchen, die Funktion der Binnenohrmuskeln und die Bedeutung der Paukenhöhle nebst Tube für das Hören zu behandeln.

Das Studium der Schallübertragung durch das Mittelohr bietet nicht geringe Schwierigkeiten, da es sich hier um Gebilde von recht kompliziertem Bau und um ganz eigenartige physikalische Verhältnisse handelt. Das meiste verdanken wir in bezug auf die Erkenntnis der Gehörknöchelchenmechanik Helmholtzens, Physik und Physiologie in gleichem Grade beherrschender, Genialität, während vor ihm und leider auch noch nach ihm [1]) über diesen Gegenstand manches Verwirrte und Verwirrende publiziert worden ist.

Während wir jetzt wissen, daß Trommelfell und Knöchelchenkette bei der Schallfortpflanzung aus der Luft auf das innere Ohr als Ganzes schwingen, daß der Steigbügel sich nach Art eines Stempels im ovalen Fenster hin und her bewegt und daß er die Labyrinthflüssigkeit gegen das ausweichende runde Fenster vor sich herschiebt, bzw. zurücksaugt, glaubten bis über die Mitte des vorigen Jahrhunderts hinaus maßgebende Physiologen und Ohrenärzte, wie Johannes Müller und Toynbee [2]), daß der Schall durch die Knöchelchenkette ebenso in Form von Verdichtungs- und Verdünnungswellen hindurchginge wie durch die übrigen Kopfknochen, und daß transversale Schwingungen des Trommelfelles allenfalls ausnahmsweise, etwa bei excessiver Stärke des Schalles, vorkämen. Hinsichtlich der Massenbewegung der Labyrinthlymphe erklärte Harless [3]) noch 1853 ausdrücklich, daß eine solche aller Wahrscheinlichkeit nach viel zu schwach oder zu langsam und nicht kongruent mit den Schallwellen sein würde. Unter den Physikern dagegen betrachteten schon Savart und Seebeck das Trommelfell als eine Membran, die wie andere in der Akustik verwendete Membranen transversaler Schwingungen fähig sei, und erörterten seine auffallende Eigenschaft, mit so vielen Tönen von verschiedener Höhe annähernd gleich gut mitschwingen zu können. Der erstere [4]) nahm an, der Eigenton des Trommelfells liege sehr hoch im Verhältnis zu allen überhaupt vernehmbaren Tönen, wodurch allerdings eine ziemlich gleichmäßige Hörstärke für die tieferen Töne bedingt sein würde. Seebeck [5]) zeigte dann durch mathematisch-physikalische Deduktionen, daß Membranen, die wie das Trommelfell im Verhältnis zu ihrem Areal wenig Masse haben, geeignet sind, auch mit Tönen mitzuschwingen, die von dem Eigenton beträchtlich differieren, und daß die einseitige Belastung des Trommelfells durch die Kette der Gehörknöchelchen und das an diese direkt angrenzende Labyrinthwasser in demselben Sinne wirke, ja geradezu das Hauptmittel sei, durch welches das Ohr in den Stand gesetzt würde, eine so große Anzahl von Tönen mit ungefähr übereinstimmender Intensität auf-

[1]) Z. B. von G. Zimmermann, Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., Supplementbd. 1899 (u. a. a. O.; vgl. die letzten Bände d. Zeitschr. u. d. Arch. f. Ohrenheilk.); von Boenninghaus, Zoolog. Jahrbücher, Abteilung f. Anat. u. Ontogenie **19**, 1903 u. A. — [2]) Krankheiten des Gehörorgans, übersetzt von Moos, Heidelberg 1863. — [3]) Wagners Handwörterbuch d. Physiol. **4**, 384. — [4]) Ann. de chim. et phys. **26**, 24. — [5]) Pogg. Ann. **62**, 289 ff., 1844 u. **68**, 458 ff., 1846.

zunehmen. Während aber Seebeck sich auf Betrachtungen über das Trommelfell beschränkte, hat Ed. Weber [1]) wohl als erster die heute geltende Auffassung von der Mittelohrmechanik in ihren Grundzügen klar und vollständig ausgesprochen und nur darin einen abweichenden Standpunkt eingenommen, daß er Hammer und Amboß zusammen als einen festen Winkelhebel betrachtete; eine Ansicht, die schon Hermann Meyer in seinem Lehrbuch der physiologischen Anatomie [2]) richtig stellte, indem er die Gelenkverbindung zwischen dem Kopfe des Hammers und der Basis des Amboß als einen Ginglymus kennzeichnete und darauf hinwies, daß weder nach vorn noch nach hinten, wohl aber von außen nach innen gerichtete Bewegungen des Hammers den Amboß nach innen schöben. Dabei bewegen sich nach Meyer Hammer und Amboß als Ganzes um eine ungefähr horizontale Achse, die durch den *Processus folianus* und den kurzen Fortsatz des Amboß geht, und die Übertragung auf den Stapes geschieht, indem das *Ossiculum Sylvii* eine Bewegung nach oben macht, der Steigbügel selbst aber vermöge des Kugelgelenkes zwischen seinem Capitulum und dem Ossiculum und infolge seiner Anheftung an gewisse Schleimhautbänder eine gerade nach innen gerichtete. Auch Mach [3]) hat sich, wiederum an Seebecks Arbeiten anknüpfend, theoretisch-deduktiv mit der Mittelohrmechanik beschäftigt. Er prüfte genauer die Umstände, die unser Ohr befähigen, das Trommelfell treffende Töne von verschiedener Höhe mit gleichmäßiger Stärke aufzunehmen sowie auch einem raschen Wechsel der Tonhöhe zu folgen, und kam dabei zu dem Resultat, daß die Labyrinthflüssigkeit um so nachgiebiger den Schwingungen der Luft folgen müsse, je größer der Widerstand, je größer die Fläche des Trommelfells, je kleiner das ovale Fenster, je kleiner die Masse des ganzen Apparates und je beträchtlicher die Hebelwirkung sei.

Helmholtz hat in seiner berühmten Studie über die Mechanik der Gehörknöchelchen und des Trommelfells [4]) der Gestalt des letzteren besondere Beachtung geschenkt. Die Spannung desselben ist durch den Handgriff des Hammers bedingt, der es nach innen zieht und selbst in dieser Lage durch seine Bänder und den *Tensor tympani* erhalten wird. Wären die Radialfasern, aus denen die äußere Schicht der Propria des Trommelfells besteht, allein vorhanden, so würden sie sich zu geraden Linien strecken; durch die die innere Schicht des Trommelfells bildenden konzentrischen Ringfasern und deren Spannung bekommen sie indessen eine gekrümmte, gegen den Gehörgang konvexe Form, wenn auch die Wölbung nur ziemlich flach ist. Helmholtz hat zuerst die akustischen Wirkungen einer analog beschaffenen Membran untersucht, die er aus einem Stück Schweinsblase herstellte. Um möglichst ähnliche Verhältnisse, wie sie das Trommelfell darbietet, zu schaffen, wurde diese Membran über einen Glascylinder gespannt und auf ihren Nabel ein Stift aufgesetzt, dessen anderes Ende als Steg für eine Saite diente. Die Saite lief in einiger Entfernung von dem Cylinder noch über einen zweiten Steg und war an ihren Enden durch zwei Wirbel gespannt. Wurde sie mit dem Bogen angestrichen, so resonierte die Membran sehr laut, und zwar

---

[1]) Ber. d. Kgl. Sächs. Gesellsch. d. Wiss., math.-physikal. Kl., 1851, S. 29. — [2]) Leipzig 1856. — [3]) Ber. d. Wiener Akad., math.-physikal. Kl., 48 (2), 283, 1863. — [4]) Pflügers Arch. f. Physiol. 1, 34 bis 43, 1869. (Wiss. Abhandl. 2, 515.)

erstreckte sich die Resonanz, wie sich durch successive Verkürzung der Saite zeigen ließ, auf einen sehr großen Teil der Skala; namentlich waren die Töne aus der Mitte der viergestrichenen Oktave, wie beim Gehörgang, begünstigt. Die Übertragung von Tonschwingungen aus der Luft auf die Saite gelang gerade so gut. Mithin trägt die eigentümliche Form des Trommelfells offenbar ebenfalls zu dessen Befähigung, verschieden hohe Töne mit gleicher Stärke aus der Luft aufzunehmen, bei [1]).

Abgesehen hiervon aber ist die Gestalt des Trommelfells und überhaupt die Konstruktion der Knöchelchenkette zu dem mechanischen Effekt geeignet, die Bewegung von relativ großer Amplitude und geringer Kraft, mit welcher die schwingenden Luftteilchen das Trommelfell treffen, in eine solche von geringerer Amplitude und größerer Kraft zu verwandeln. Die größere Kraft ist nötig, um das im Verhältnis zur Luft dichte und schwere Labyrinthwasser schnell hin und her zu treiben, während die geringere Amplitude immer noch zu einer genügenden Bewegung der Nervenendigungen in der Schnecke ausreicht. Eine solche mechanische Aufgabe läßt sich in der Technik auf mancherlei Weise, durch Flaschenzüge, Krähne, Hebel usw. lösen. Die Art aber, wie dies in der Trommelhöhle geschieht, ist ganz eigentümlich. Eine regelrechte Hebelwirkung findet zwar auch statt, insofern eben Hammer- und Amboßstiel einen Winkelhebel darstellen und der vom Hammer gebildete Arm etwa anderthalbmal so lang ist als der andere, so daß der Druck auf den Steigbügel ungefähr anderthalbmal so groß sein wird als die Kraft, welche die Spitze des Hammerstieles einwärts treibt. Die Hauptverstärkung wird jedoch durch die flache Wölbung der Trommelfellfläche gegen den Gehörgang bedingt. Denn dadurch, daß die Radiärfasern die Form schwach gekrümmter Bögen haben, entsteht unter dem Druck einer Luftverdichtung im Gehörgang eine mechanische Wirkung, als ob der Luftdruck am Ende eines sehr langen Hebelarmes angriffe und die Spitze des Hammerstieles das Ende eines sehr kurzen Hebelarmes bildete. Mit anderen Worten, eine relativ bedeutende Verschiebung der Trommelfellfläche hat nur eine verhältnismäßig kleine Bewegung der Hammerspitze zur Folge; es findet also eine Reduktion der Elongationen statt, wofür in entsprechendem Maße Kraft gewonnen werden muß. Daß es sich in der Tat so verhält, hat Helmholtz nicht nur mathematisch bewiesen, sondern auch experimentell. Er füllte den Gehörgang eines anatomischen Präparates vollständig mit Wasser und setzte mittels einer passenden Vorrichtung ein Manometerröhrchen auf, das sehr genau die Verschiebungen des Trommelfelles anzeigte, wenn dieses zu Bewegungen veranlaßt wurde. Letzteres geschah in der Weise, daß die in einem, in den Vorhof des Labyrinthes eingefügten Röhrchen befindliche Flüssigkeit angesogen oder einwärts gedrückt wurde, wobei Zug und Druck sich durch die Knöchelchenkette auf das Trommelfell fortpflanzten. Die Exkursionen des Hammers wurden an den Bewegungen eines aufgekitteten Glasfadens gemessen, und es ergab sich aus der Vergleichung der Ausschläge des Hammers und des Trommelfelles, daß die mittlere Verschiebung dieser Membran etwa dreimal so groß war als die gleichzeitige Bewegung der Hammerstielspitze.

---

[1]) Vgl. die bestätigenden Versuche von Politzer, Archiv f. Ohrenheilk. 6, 36, 1874.

Im einzelnen ist über den Bewegungsmodus der Gehörknöchelchenkette bei der Übertragung von Tonschwingungen auf das innere Ohr nachstehendes zu sagen, allerdings mit der Einschränkung, daß kleine anatomische und physiologische individuelle Differenzen häufig sind. Das im ganzen sattelförmige Gelenk zwischen Hammer und Amboß ist nach Helmholtz in seiner Wirkung den Gelenken der bekannten mit Sperrzähnen versehenen Uhrschlüssel vergleichbar. Solche Sperrzähne hat das Hammer-Amboßgelenk namentlich an seiner unteren Seite, und zwar liegt der des Hammers außen, dem Trommelfell zugekehrt, der des Amboß innen, während umgekehrt gegen das obere Ende der Gelenkgrube hin der Amboß mehr nach außen, der Hammer nach innen übergreift. Infolge hiervon packt der Hammer, wenn sein Stiel einwärts schwingt, den Amboß ganz fest und nimmt ihn mit. Geht aber das Trommelfell mit dem Hammerstiel nach außen, so braucht der Amboß bei excessiver Elongation nicht zu folgen, da dann die Sperrzähne auseinanderweichen und die Gelenkflächen aneinander gleiten. Nach den Versuchen von Helmholtz ist die freie Exkursion, welche der Hammer mit dem Stiel nach außen machen kann, indem er sich gegen den Amboß im Gelenk verschiebt, mindestens neunmal so groß als die, welche er mit Amboß und Stapes zusammen auszuführen imstande ist. Die gemeinsame Drehung von Hammer und Amboß vollzieht sich um eine Achse, welche, wie Helmholtz in Übereinstimmung mit Politzer gefunden hat, eine gewisse Beweglichkeit besitzt. Beim Einwärtsschwingen des Hammergriffes wird der Hammerkopf durch den Amboß nach hinten gezogen, so daß der Stiel etwas nach vorwärts rückt. Dadurch wird eine Verschiebung des Trommelfellnabels nach hinten, die sich sonst aus der schrägen Richtung des Hammerachsenbandes gegen die Ansatzebene des Trommelfells ergeben würde, ausgeglichen. Anderseits wird eine Hebung des Nabels bei der Einwärtsbewegung des Hammerstieles durch eine ebenfalls vom Amboß bewirkte Senkung des ganzen Hammers kompensiert, so daß durch diese Einrichtungen die geradlinige Bewegung des Nabels nach innen garantiert wird. Bei der Übertragung der Einwärtsbewegung des Hammerstieles auf den Steigbügel kommt in Betracht, daß die Spitze des langen Amboßfortsatzes noch etwas mehr in die Höhe steigt, als durch die eben erwähnte Senkung des Hammers rückgängig gemacht wird. Dadurch wird auch, wie Helmholtz, Henke und andere Autoren im Gegensatz zu der vorhin angeführten Darstellung Hermann Meyers beobachtet haben, das Köpfchen des Steigbügels gehoben, so daß der obere Rand der Fußplatte beim Eindringen in den Vorhof weiter vorgeschoben wird als der untere. Zugleich rückt das *Ossiculum Sylvii* etwas nach vorn, weshalb auch das vordere Ende des Steigbügeltrittes ein wenig tiefer ins Labyrinth dringt als das hintere. Die Beweglichkeit der Stapesbasis ist übrigens gering. Die größten Werte, die Helmholtz für die Exkursionen derselben erhielt, betrugen nur $^1/_{14}$ bzw. $^1/_{18}$ mm.

Der Vorgang der Schallübertragung durch das Mittelohr ist also, mit wenig Worten nochmals beschrieben, der folgende. Das Trommelfell schwingt mit dem fortzuleitenden Tone oder Klange als resonierende Membran mit. Bei seiner Einwärtsbewegung geht die Hammergriffspitze mit nach innen und, da die Bewegung des Hammers im wesentlichen eine Drehung um das Achsenband ist, der Hammerkopf nach außen. Dabei nimmt letzterer den

Kopf des Amboß, der sich seinerseits um seinen kurzen Fortsatz als Achse dreht, mit und veranlaßt so eine Hebung und Einwärtsbewegung des langen Amboßfortsatzes, durch welche der Steigbügel in den Vorhof gedrückt wird. Beim Auswärtsschwingen des Trommelfells verlaufen die Bewegungen der Knöchelchen umgekehrt.

Daß die Knöchelchenkette samt dem Labyrinthwasser nicht nur bei gewaltsamen Druckveränderungen, sondern auch unter der Einwirkung von Tonwellen als Ganzes hin und her oszilliert und der Schall nicht etwa durch die unbewegliche Kette in Form von Molekularschwingungen zur Basilarmembran dringt, ergibt sich erstens als theoretisch notwendige Konsequenz aus dem Umstande, daß die Dimensionen der in Frage kommenden Teile des mittleren und inneren Ohres verschwindend gering gegen die Wellenlängen der Töne sind [1]), zum mindesten gegen die Wellenlängen der tieferen Töne. Je mehr die Tonhöhe steigt, um so weniger wird freilich diese Bedingung erfüllt, um so weniger sind wir aber auch anderseits auf die kraftvolle Übertragung der Schallschwingungen aus der Luft auf das innere Ohr seitens der Knöchelchenkette angewiesen. Denn mit zunehmender Schwingungszahl gehen die Tonwellen immer leichter unmittelbar von der Luft auf die Kopfknochen über, durch die sie dann direkt zum Labyrinth gelangen, und verliert, wie namentlich aus den reichen Erfahrungen Bezolds [2]) hervorgeht, die durch Funktionsstörungen im Mittelohr bedingte Schädigung des Gehörs für Luftleitung immer mehr an Bedeutung, weshalb Bezold es auch direkt ausspricht, „daß in der Aufnahme der tiefen Töne aus der Luft... die Haupt-, ja wahrscheinlich die einzige Funktion des Schallleitungsapparates besteht".

Zweitens lassen sich die Schwingungen der Gehörknöchelchenkette bei der Leitung von Tonwellen direkt beobachten. Versuche hierüber hat meines Wissens zuerst Politzer [3]) angestellt. An dem Kopfe einer möglichst frischen menschlichen Leiche wurde das *Tegmen tympani*, das Dach der Paukenhöhle, der einen Seite entfernt und auf der höchsten Spitze des freigelegten Hammers ein an seinem Ende mit einer Federfahne versehener dünner Glasfaden oder Strohhalm aufgekittet. Der Gehörgang des Präparates stand durch einen Schlauch mit einem Helmholtzschen Resonator in Verbindung, welcher auf eine in seiner Nähe aufgestellte Orgelpfeife abgestimmt war. Tönte die Pfeife, so geriet der Fühlhebel in Schwingungen, die mittels der Federfahne auf einen rotierenden berußten Cylinder aufgezeichnet werden konnten. Auf diese Weise gewann Politzer auch vom menschlichen Amboß und von der Columellaplatte [4]) einer Ente sehr klare Kurven, und zwar nicht nur von einfachen Tönen, sondern auch von Schwebungen und von einem aus Grundton und Oktave bestehenden Klange, aus deren Beschaffenheit zu entnehmen ist, daß die Gehörknöchelchenkette zusammengesetzte Tonbewegungen nach dem Superpositionsprinzip überträgt. Lucae [5]) erhielt die gleichen Resultate, indem er die Töne dem Trommelfelle nicht durch die Luft im äußeren Gehörgang, sondern auf dem Wege der Knochenleitung zuführte, womit zugleich der Beweis erbracht wurde, daß wir den Ton einer

[1]) Vgl. Helmholtz, Mechanik der Gehörknöchelchen, Pflügers Arch. 1. — [2]) Münch. mediz. Wochenschr. 19 u. 20 (1900). — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. 1, 59, 1864. — [4]) Die Columella ist das Analogon der Gehörknöchelchenkette des Menschen. — [5]) Arch. f. Ohrenheilk. 1, 303, 1864.

auf unseren Kopf gesetzten Stimmgabel nicht allein durch direktes Übergehen der Wellen aus dem Knochen auf das Labyrinth, sondern auch durch Vermittelung des Paukenapparates hören. Politzer[1]) hat diesen Beweis noch durch folgendes Experiment gestützt. Das Labyrinth eines Präparates, dessen Amboß-Steigbügelgelenk getrennt war, wurde mit Luft gefüllt und durch den *Porus acusticus internus* auskultiert, während eine auf den Knochen gesetzte Gabel tönte; beim Abheben des Amboß vom Steigbügel wurde der Ton jedesmal schwächer, beim Wiederanlegen stärker.

Die Fühlhebel bilden indessen, wie Buck[2]) gezeigt hat, eine störende Belastung der Knöchelchen. Auf Anregung und unter Leitung von Helmholtz beobachtete daher dieser Autor die unter der Wirkung eines kräftigen, direkt in den Gehörgang dringenden Pfeifentones schwingenden Knöchelchen von oben her mikroskopisch und maß die Schwingungsamplituden einzelner Punkte ihrer Oberfläche, die, von einer hellen Lampe beleuchtet, entweder infolge ihrer Feuchtigkeit oder infolge Bestäubens mit Amylum hell glänzten. Auch das Mitschwingen des runden Fensters ließ sich auf diese Weise anschaulich machen. Erwähnenswert ist, daß die Exkursionen der Knöchelchen durch Zerstörung der *Fenestra rotunda* oder Durchschneidung der Tensor- und Stapediussehne nicht verändert wurden. Mikroskopische Beobachtungen der schwingenden Gehörknöchelchen sind später noch von Burnett[3]), von Politzer[4]) und von Mach in Gemeinschaft mit Kessel[5]) ausgeführt worden. Die zuletzt Genannten brachten eine stroboskopische Verlangsamung der Bewegungen zur Anwendung, was ein sehr genaues Studium der Details ermöglichte. So konnten sie sich durch diesen Kunstgriff davon überzeugen, daß das runde Fenster sich jedesmal nach außen wölbte, wenn der Steigbügel in den Vorhof eindrang. Wurden zu hohe Töne benutzt, so wurden die Elongationen zu klein, um sichtbar zu sein.

Mach und Kessel[6]) haben auch beim Lebenden die Schwingungen des mit Goldbronze bestäubten Trommelfells mittels einer sinnreichen Vorrichtung während der Zuleitung eines Tones durch den Gehörgang mikroskopisch beobachtet. Desgleichen experimentierte Berthold[7]) am lebenden Menschen. Das Prinzip der manometrischen Flamme benutzend, machte er den äußeren Gehörgang zur Gaskammer und erhielt im rotierenden Spiegel schöne Flammenkurven, wenn auf den Schädel eine tönende Gabel gesetzt wurde. Nagel und Samojloff[8]) konnten dieses Resultat bestätigen. Sie stellten außerdem ähnliche Versuche an einem Tierkopfe an, wobei die Paukenhöhle als Gaskammer diente. Daß bei solchen Experimenten wirklich die Schwingungen des Trommelfelles es sind, die die Vibrationen der Flamme hervorrufen, folgt daraus, daß die letzteren aufhören oder geringer werden, wenn man die Trommelfellbewegungen während der Beobachtung durch geeignete Maßnahmen hindert oder erschwert. Die Autoren bekamen übrigens eine Reaktion des Trommelfelles nicht nur dann, wenn vor der in den Gehörgang des Präparates führenden Röhre mit gewöhnlicher Intensität gesungen, gesprochen

---

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 330, 1864. — [2]) Arch. f. Augen- und Ohrenheilkunde **1** (2), 121, 1870. — [3]) Ebenda, **2** (2), 64, 1872. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **6**, 41 f., 1873. — [5]) Ber. d. Kais. Akad. z. Wien, math.-physikal. Kl., **69** (3), 221 ff., 1874. — [6]) Ebenda **66** (3), 1872. — [7]) Monatsschr. f. Ohrenheilk. 1872 (3). — [8]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1898, S. 505.

oder gepfiffen wurde, in welchem Falle die Flamme sehr starke Schwingungen machte, sondern auch noch, wenn leise geflüstert ward. Schon damit erledigt sich ohne weiteres der von Zimmermann gegen die Massenschwingungen des Mittelohrapparates ins Feld geführte Einwand, daß dieselben nur bei übertrieben starker Schallerregung gleichsam als eine Art Kunstprodukt in die Erscheinung träten.

Wenn nun aber durch die Schwingungen der Gehörknöchelchenkette die Tonwellen der Luft in zwar kleinere, jedoch dafür kräftigere Oszillationen umgewandelt werden, so fragt es sich, ob und wodurch ein das Labyrinth schädigender Effekt allzu lauter Töne oder Geräusche verhütet werden kann. In dieser Beziehung machte Helmholtz darauf aufmerksam, daß unter dem Druck einer übermäßigen Luftverdichtung im Gehörgang das Trommelfell durchgebogen und dadurch der Hammerstiel wieder nach auswärts gezogen werden würde, falls die Membran nicht schon vorher platzen sollte. Einer excessiven Bewegung nach dem Gehörgang zu, welche die Folge einer hochgradigen Verdichtung der Paukenhöhlenluft oder Verdünnung der äußeren Luft sein könnte, widersteht anderseits das *Ligamentum externum* und das *Ligamentum superius mallei;* außerdem wirkt der Umstand, daß der Hammer mit dem Handgriff auswärts schwingen kann, ohne den Amboß mitzunehmen, in dem gleichen Sinne, und schließlich dürfte auch das Gelenk zwischen Amboß und Steigbügel noch eher zerreißen als das Ringband, mittels dessen die Stapesplatte im ovalen Fenster befestigt ist.

Als ein Schutzorgan des Ohres ist vielfach auch der *Tensor tympani* bezeichnet worden. Helmholtz betrachtete denselben als ein mäßig straffes, elastisches Band, dessen Spannung zeitweilig durch aktive Zusammenziehung beträchtlich erhöht werden könne und dessen Zweck hauptsächlich im Anspannen des Hammerachsenbandes bestehe, welches dadurch zugleich mit dem Stiele des Hammers und dem Trommelfelle nach innen gezogen werde. Das Resultat einer Tensorkontraktion würde hiernach das sein, daß erstens die Schwingungen der Knöchelchenkette verringert werden und zweitens in der Ruhe der Steigbügel weiter labyrinthwärts als gewöhnlich im ovalen Fenster steht. Die Dämpfung würde ihrerseits eine Schwächung namentlich der tieferen aus der Luft zum Ohre gelangenden Töne zur Folge haben müssen und die Einpressung des Steigbügels in den Vorhof eine Steigerung des Labyrinthdruckes. Daß es sich wirklich so verhält, ist durch zahlreiche Beobachtungen und Versuche[1]) an gesunden und kranken Menschen, an anatomischen Präparaten und an Modellen festgestellt.

Zunächst ist in dieser Beziehung zu erwähnen, daß die Durchschneidung der Tensorsehne bei Patienten eine Vergrößerung der Schwingungsweite des Mittelohrapparates hervorruft, die nach Bezold namentlich die Auswärtsbewegung betrifft. Kessel beobachtete im Anschluß an die Tenotomie gelegentlich eine mehrtägige Hyperästhesie gegenüber den höheren Tönen bei

[1]) Die seit 1864 erschienenen Publikationen über die normale und pathologische Funktion der Binnenohrmuskeln sind im Archiv für Ohrenheilkunde zum Teil als Originalartikel enthalten, zum anderen Teil referiert, so daß die Durchsicht dieser Zeitschrift dem Interessenten einen wohl als vollständig zu bezeichnenden Überblick über die einschlägige Literatur ergeben dürfte. Dasselbe gilt übrigens bezüglich der Tubenwirkung und der Druckverhältnisse in Pauke und Labyrinth.

normaler Hörschärfe. Was die Versuche an Gesunden anlangt, so handelt es sich dabei zumeist um Personen, die imstande sind, ihren Tensor willkürlich zu kontrahieren. Ich gehöre selbst zu denen, die diese Fähigkeit besitzen. Zum Zwecke der Tensorzusammenziehung hebe ich das Gaumensegel. Dabei entsteht in der Regel ein knackendes Geräusch in beiden Ohren, das von der Öffnung der Tuben herrührt. Neben diesem Knacken und noch deutlicher, wenn dasselbe einmal ausbleibt, habe ich eine sehr weiche, sehr kurz dauernde, flatternde Gehörsempfindung, die zweifellos von einer Mitbewegung des Trommelfells verursacht wird, da der Eindruck ganz derselbe ist wie derjenige, den das rasche Vorüberführen eines Fingers vor der Gehörgangsöffnung erzeugt. Während der Tensorkontraktion werden, wie ich, die Angaben verschiedener Autoren bestätigend, aussagen kann, aus der Luft zugeleitete tiefere und mittlere Töne merklich gedämpft. Am besten gelingt ein solcher Versuch, wenn der Ton ziemlich kräftig ist. Beobachtungen an Präparaten des Gehörorganes von Menschen und Tieren sind namentlich von Politzer[1]) und Lucae[2]) angestellt. Die Resultate derselben sind dahin zusammenzufassen: Wenn während der Zuleitung eines Tones durch den Gehörgang oder vom Knochen aus das Trommelfell durch Ziehen an einem an der Tensorsehne befestigten Faden oder durch elektrische Reizung der motorischen Nervenbahn des Tensors angespannt wird, so läßt sich beim Auskultieren der Paukenhöhle durch den Gehörgang oder durch die Tube eine Abschwächung des Grundtones neben einem Hervortreten der Obertöne konstatieren und zeigen anderseits irgendwo auf die Knöchelchenkette aufgesetzte Fühlhebel eine Verminderung der Exkursionen an. Die Versuche an Modellen haben im wesentlichen das Gleiche ergeben, sind aber natürlich weniger beweiskräftig.

Die Zahl derjenigen, deren Trommelfellspanner dem Willen unterworfen ist, scheint nur gering zu sein. Die Bewegungen dieses Muskels sind im allgemeinen reflektorische. Den sensiblen Teil der vor einigen Jahren von V. Hammerschlag[3]) genauer untersuchten Reflexbahn bildet der Acusticus, den motorischen der Trigeminus, wie zuerst von Politzer[4]) experimentell gezeigt wurde, der im Verlaufe seiner hierauf bezüglichen Untersuchung sich auch mittels verschiedener Methoden davon überzeugte, daß eine Tensorkontraktion den intralabyrinthären Druck steigert.

Demnach wäre die Schutzfunktion des Tensors so zu denken, daß der Muskel sich auf reflektorischem Wege unter der Einwirkung eines überlauten Schalles während der ganzen Dauer desselben, also unter Umständen tetanisch, zusammenzieht und damit die Schwingungen des Mittelohrapparates hemmt. Es soll nun gewiß nicht geleugnet werden, daß ein solcher Vorgang möglich ist. Aber anderseits muß auch als Einschränkung hervorgehoben werden, daß gerade die am leichtesten unerträglich werdenden hohen Töne durch die Paukenfellspannung wenig oder gar nicht gedämpft werden und daß das Ohr in jedem Falle während der, freilich ja nur kurzen, Reaktionszeit ungeschützt bleibt. Außerdem ist es noch nicht entschieden, ob überhaupt unter nor-

---

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 68 ff. u. 326, 1864. — [2]) Ebenda **1**, 311. — [3]) Ber. d. Wiener Akad., math.-naturw. Kl., **108** (3), 1899 u. Arch. f. Ohrenheilk. **47**, 251, 1899. — [4]) Ber. d. Wiener Akad., math.-naturw. Kl., **43** (2), 1861.

malen Verhältnissen tetanische Kontraktionen des Tensors vorkommen. Bockendahl[1]), ein Schüler Hensens, beobachtete zwar den Tetanus, befindet sich aber damit in direktem Gegensatz zu älteren Versuchen von Hensen selbst, in denen kein Tetanus erzeugt werden konnte. Auch Ostmann[2]), der bei Ohrenkranken durch intensive hohe Töne und unangenehm laute Geräusche ausgelöste reflektorische Trommelfelleinziehungen otoskopisch beobachtete[3]), spricht immer nur von „Zuckungen" des Tensors, und ich selbst muß sagen, daß ich bei plötzlich einsetzenden gellenden Geräuschen ein schwirrendes Gefühl in der Gegend des Trommelfells habe, das eher den Eindruck einer raschen Aufeinanderfolge mehrerer Zusammenziehungen als den einer Dauerkontraktion macht. Im übrigen ist gewiß bemerkenswert, daß es beim Menschen vorwiegend oder allein gerade die hohen, nicht dämpfbaren Töne zu sein scheinen, die den Tensor erregen. Somit ist die Schutzfunktion des Trommelfellspanners doch in mancher Beziehung recht fraglich.

Von verschiedenen Autoren ist denn auch dem Tensor eine andere Leistung zugeschrieben worden, nämlich eine Accommodation des Trommelfelles. Wiederholt und sehr eingehend hat sich Mach[4]) mit diesem Gegenstande beschäftigt. Er stellte die Hypothese auf, daß der Muskel durch seine veränderliche Spannung eine Verschiebung des Maximums der Mitschwingungsfähigkeit des Trommelfells von einer Tonhöhe zur anderen herbeiführe, daß jeder Tonhöhe ein bestimmter Kontraktionsgrad des Tensors entspräche und daß die Unterschiede der Spannungsempfindungen zur Erkennung der Tonhöhe verwertet würden. Er hat jedoch später selbst diese Idee wieder fallen gelassen, da es ihm auf keine Weise gelingen wollte, experimentelle Stützen für dieselbe zu gewinnen. Weder durch Auskultation noch durch Inspektion des Trommelfelles einer auf verschiedene Tonhöhen nacheinander horchenden Versuchsperson konnte irgend eine Veränderung der Paukenfellspannung wahrgenommen werden. Auch Schapringer[5]), der die bei willkürlicher Zusammenziehung seines Tensors erfolgende Einwärtsbewegung des Trommelfelles mittels eines in den Gehörgang eingesetzten Manometers demonstrieren konnte, vermochte keinerlei Accommodationsvorgänge zu konstatieren, und ebensowenig ist dies trotz vieler Bemühungen W. Heinrich[6]) am lebenden Menschen gelungen. Hensen[7]) hat, gestützt auf Beobachtungen an curarisierten Tieren, die Meinung vertreten, der Tensor zucke zu Anfang jedes Schalleindruckes und dämpfe beim Sprechenhören die Konsonanten zugunsten der Perzeption der wichtigeren Vokale. Seine Angabe, daß der Tensor des Hundes auf Schall reagiere, und zwar auf hohe Töne stärker als auf tiefe, ist durch die schon erwähnte Arbeit von Bockendahl bestätigt worden, desgleichen von Pollak[8]). Aber eine eigentliche Accommodation des

[1]) Üb. d. Beweg. d. M. tensor tympani usw., Kieler Diss., 1880, S. 16. — [2]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1898, S. 75 ff. — [3]) Daß die durch den Tensor bewirkte Trommelfellanspannung beim Lebenden sichtbar sein kann, war übrigens schon vorher bekannt. — [4]) Ber. d. Wiener Akad., math.-naturw. Kl., **48** (2), 1863; **50** (2), 1864; **51** (2), 1865; (mit Kessel) **66** (3), 1872. — [5]) Ebenda, **62** (2), 1870. — [6]) Zentralbl. f. Physiol., 1896 (7). Heinrichs neueste Versuche am Tierpräparat (Bull. de l'Acad. d. sciences de Cracovie, Cl. math. et nat., 1903) beweisen zum mindesten nichts für den Menschen. — [7]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1878, S. 312. Siehe auch Pflügers Arch. **87**, 355, 1901. — [8]) Med. Jahrbücher 1886, S. 555 ff. Vgl. auch Hammerschlag, Arch. f. Ohrenheilk. **46**, 1, 1899.

Trommelfelles scheint mir durch diese Versuche keineswegs bewiesen. Ich finde vielmehr, daß dieselbe um so unwahrscheinlicher wird, je genauer man alle dabei in Betracht kommenden Punkte durchdenkt.

Alles in allem genommen hat sich also bis jetzt eine bestimmte Tensorfunktion nicht feststellen lassen, und ähnlich verhält es sich mit dem *Musculus stapedius*. Derselbe wird vom Facialis innerviert und gelegentlich bei der Tätigkeit anderer von dem gleichen Nerven versorgter Muskeln mit kontrahiert. So bemerkte Gottstein[1]) an sich selbst beim Lauschen ein eigentümliches Spannungsgefühl im Ohre, das er auf den Stapedius bezog. In neuerer Zeit hat wiederum Ostmann[2]) darauf hingewiesen, daß der Stapedius besonders dazu geeignet scheine, beim Horchen in Aktion zu treten. Einerseits sei es wahrscheinlich, weil dabei ohnehin verschiedene vom Facialis abhängige Muskeln kontrahiert würden; anderseits müsse eine Innervation des Steigbügelmuskels die Schallwahrnehmung günstig beeinflussen, was ja beim Lauschen erstrebt werde. In der Tat macht der Steigbügel nach den Angaben von Politzer[3]), von Eysell[4]), von Mach und Kessel[5]) infolge einer Verkürzung des Stapedius mit dem vorderen Teile seiner Fußplatte eine nach der Pauke gerichtete Bewegung, so daß unter gleichzeitiger Verminderung des Labyrinthdruckes der stumpfe Winkel zwischen Incus und Stapes gestreckter wird, die Knöchelchenkette auswärts rückt und das Trommelfell sich ein wenig entspannt, wodurch nach den Ausführungen von Helmholtz u. a. die Mitschwingungen des Mittelohrapparates vergrößert werden. Indessen erheben sich doch auch Bedenken gegen die Ansicht Ostmanns. Beim anhaltenden Lauschen auf einen sehr leisen kontinuierlichen Schalleindruck müßte der Stapedius tetanisch kontrahiert sein, und dadurch würde, abgesehen von dem störenden Muskelton, wieder eine Schwächung des Gehörs eintreten. Denn der Muskel zieht das Köpfchen des Steigbügels, das bei den Inkursionen der Kette nach vorn und oben geht, nach der entgegengesetzten Richtung. Er wirkt daher bei der Dauerkontraktion offenbar hemmend auf die Schwingungen der Knöchelchen, und zwar in einer Weise, die ihn als Antagonisten des Tensors erscheinen läßt, insofern er vorwiegend die Einwärtsbewegungen hindert, während jener mehr die Exkursionen verringert.

Politzer hat das Verdienst, auf den Antagonismus zwischen Tensor und Stapedius besonders aufmerksam gemacht zu haben. Er[6]) hat auch die Meinung ausgesprochen, daß die wichtigste Funktion der beiden Muskeln darin bestehe, die durch die Luftdruckschwankungen bedingten Änderungen in der Spannung der Gehörknöchelchen und des Labyrinthinhaltes zu beseitigen, also den Spannungsgrad des Gehörapparates zu regulieren. Diese Ansicht ist freilich durchaus nicht ganz von der Hand zu weisen. Das Hauptmittel zum Ausgleich von Störungen und namentlich von anhaltenderen Störungen des Labyrinthdruckes ist aber wohl in den Zirkulationsverhältnissen im inneren Ohre zu suchen, während anderseits Unterschiede des Luftdruckes im Gehörgange und in der Pauke in erster Linie durch die von Zeit zu Zeit erfolgende Öffnung der Tube redressiert werden dürften.

---

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **16**, 60. — [2]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1899, S. 546. — [3]) Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **43** (2), 431, 1861 u. Arch. f. Ohrenheilk. **9**, 162 f., 1875. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **5**, 245 ff., 1870. — [5]) Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **69** (2), 221 ff., 1874. — [6]) Arch. f. Ohrenheilk. **4**, 23, 1869.

Die meisten maßgebenden Autoren stimmen darin überein, daß die Eustachische Röhre nicht fortwährend offen ist und also keine ständige Ausgleichung des Luftdruckes innerhalb und außerhalb der Trommelhöhle stattfindet, sondern daß die Wandungen der Ohrtrompete in der Ruhe aneinander liegen und die Eröffnung [1]) nur bei gewissen Muskelaktionen, besonders bei der Schlingbewegung eintritt. Freilich ist der normale Tubenverschluß offenbar bei verschiedenen Personen verschieden kräftig. Damit erklären sich unter anderem die gelegentlich von Ohrenärzten beobachteten respiratorischen Trommelfellbewegungen, die auf eine Durchgängigkeit der Tube für den Respirationsstrom schließen lassen, wenn man sie nicht mit Lucae [2]) auf Druckschwankungen der Paukenluft infolge von Gaumensegelbewegungen zurückführen will. Die Regel ist aber jedenfalls, daß die Tube dem Durchtritt der Luft einen mehr oder weniger beträchtlichen Widerstand entgegensetzt. Wie oft festgestellt ist, tritt beim Besteigen höherer Berge in der verdünnten Atmosphäre ein eigentümliches, auf dem Überdruck der Trommelhöhlenluft beruhendes Gefühl von Spannung im Ohre ein, das beim Schlucken sofort zu weichen pflegt. Anderseits wird beim Aufenthalt in stark komprimierter Luft [3]) das Trommelfell nach innen gedrückt, so daß Rötung und Schmerzen neben der Empfindung der Völle auftreten. Auch hier erfolgt der Ausgleich durch eine die Tube eröffnende Schlingbewegung, wenn nicht gar das gewaltsame Einpressen von Luft durch forcierte Exspiration bei geschlossenem Munde und zugehaltener Nase nötig wird. Letzteres Experiment, bekannt unter dem Namen des Valsalvaschen Versuches, liefert übrigens, unter gewöhnlichen Verhältnissen ausgeführt, schon an sich den Beweis, daß in den meisten Fällen eine gewisse Kraft nötig ist, um den Tubenverschluß von außen zu sprengen, ebenso wie das umgekehrte, auch der negative Valsalvasche Versuch genannte, Experiment, das darin besteht, daß während des Zuhaltens von Mund und Nase tief inspiriert wird, und das eine Luftverdünnung in der Pauke mit Einziehung des Trommelfelles zur Folge hat [4]). Bei diesem Experiment dringt nach Politzer [5]) gewöhnlich erst infolge einer Schluckbewegung wieder Luft in die Pauke, während der Überdruck beim positiven Valsalvaversuch sich von selbst ausgleichen kann [6]).

Mach und Kessel [7]) konstatierten im pneumatischen Kabinett, daß das Trommelfell auf positive und negative Druckschwankungen mit entsprechenden Ein- und Auswärtsbewegungen reagierte, und folgerten auch ihrerseits hieraus, daß die Tuben in der Regel geschlossen seien. Der akustische Nutzeffekt dieser Einrichtung zeigt sich, wie die beiden Autoren mit Recht hervorheben, darin, daß die Schallintensität eine größere ist. Bei den tieferen Tönen ist der ganze Kopf gleichsam in die Schallwelle getaucht, und alle Teile des Ohres

[1]) Über den Mechanismus derselben vgl. den Abschnitt „Anatomische Vorbemerkungen". — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 96, 1864. — [3]) Vgl. Magnus, Ebenda **1**, 269, 1864. — [4]) Statt der Inspiration kann man auch den Schlingakt benutzen (sog. Toynbeescher Versuch). — [5]) Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **43** (2), 434, 1861. — [6]) Vgl. Hartmann (Experimentelle Studien über die Funktion der Eustachischen Röhre, Leipzig, Veit & Co., 1879, S. 11), nach dessen Beobachtungen im pneumatischen Kabinett die Tuben in der Ruhestellung ihrer Muskulatur sich wie Klappen verhalten, die nach dem Nasenrachenraum sich auf Druck in der Pauke öffnen, bei erhöhtem Druck im Nasen-Rachenraum aber geschlossen bleiben. — [7]) Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **66** (3), 1872.

befinden sich fast in derselben Druckphase. Würden nun die Tuben offene Röhren sein, so würde das Trommelfell gleichzeitig auf beiden Seiten von einer Verdichtung bzw. Verdünnung getroffen werden und daher nicht hinreichend ausgiebig schwingen können. Mach und Kessel ahmten dieses Verhältnis in der Art nach, daß sie einen Ton durch einen gegabelten Schlauch zugleich in den Gehörgang und in die Pauke leiteten. Die Knöchelchenkette blieb dabei, wie die mikroskopische Betrachtung ergab, in Ruhe, geriet aber in starke Schwingungen, sobald ein Arm des Schlauches abgeklemmt ward. Für die möglichst große Ausnutzung der Schallstärke ist demnach eine möglichst einseitige Zuleitung zum Trommelfell erforderlich und der Verschluß der Tuben sehr nützlich. Immerhin darf aber dieser Verschluß kein dauernder sein, denn sonst würde die Luft in der Pauke allmählich verschwinden, das Trommelfell samt der Knöchelchenkette durch den äußeren Luftdruck labyrinthwärts gepreßt und die Schwingungsfähigkeit entsprechend reduziert werden.

Bau und Form der Pauke sind also, wie man sieht, akustisch durchaus zweckmäßig. Hinter dem Trommelfell befindet sich eine mit Luft gefüllte Höhle, deren Größe genügt, um der Membran bei ihren Schwingungen keine Widerstände zu bieten, und die dabei doch nicht so geräumig und glattwandig ist, daß sie durch Resonanz schädlich wirken könnte. Diese Höhle ist für gewöhnlich geschlossen, so daß keine störenden Schallwellen in sie hineinzudringen vermögen; sie läßt sich aber von Zeit zu Zeit durch den Schluckakt öffnen und somit ventilieren.

Von mehreren Autoren wird angegeben, daß ein in die Nase geleiteter oder durch die eigene Stimme erzeugter Ton bei der Öffnung der Tuben durch eine Schlingbewegung oder durch den Valsalvaschen Versuch verstärkt gehört werde. Stehen die Tuben infolge von Muskelkontraktionen oder anderen pathologischen Zuständen anhaltend offen oder hindert man den Verschluß durch Einführung eines Katheters [1]), so tritt Tympanophonie (Autophonie) ein. Die Patienten haben die Empfindung, als ob ihre Stimme statt aus dem Munde direkt von innen ins Ohr dringe; die Stimme klingt dabei peinlich schmetternd und abnorm laut; auch wird die Atmung zuweilen als lästiges Rauschen gehört. Zum Glück pflegt die Autophonie meist nur anfallsweise aufzutreten und sich durch geeignete Maßregeln für kürzere oder längere Zeit beseitigen bzw. dauernd heilen zu lassen.

Daß die Tube nicht etwa normalerweise zur Wahrnehmung der Stimme dient, wie früher von einigen behauptet worden ist, geht schon aus der alten, von Joh. Müller auf Schellhammer zurückgeführten Erfahrung hervor, daß eine in den Mund geführte tönende Stimmgabel nicht gehört wird. Wenn Schwerhörige es für die Verbesserung der Schallperzeption nützlich finden, den Mund zu öffnen, so ist als Erklärung dafür wohl in erster Linie die Sistierung der Atmungsgeräusche heranzuziehen.

Die Einwärtspressung der Gehörknöchelchenkette durch eine Luftverdichtung im äußeren Gehörgang schwächt die aus der Luft zugeleiteten Töne, namentlich die tiefen, trotzdem an sich Preßluft den Schall besser leitet als gewöhnliche. Hiervon hat man sich schon vor längerer Zeit wieder-

[1]) Poorten, Monatsschr. f. Ohrenheilk. 1874, S. 27.

holt in Taucherglocken überzeugt. Derselbe Effekt läßt sich in sehr einfacher Form erzielen, wenn man einen Gummiballon durch einen Schlauch mit dem Ohre luftdicht verbindet und, während eine tönende Gabel auf den Schlauch gesetzt wird, den Ballon komprimiert. Diese Versuchsanordnung ist von Gellé in die otiatrische Diagnostik eingeführt worden[1]). Kessel[2]) konnte durch ein ganz ähnliches Verfahren die tiefen Töne bis in die große Oktave hinein und die Töne sehr hoher Klangstäbe völlig auslöschen; bei einer Druckverminderung im Gehörgang fand er die tiefen Töne bis c^4 geschwächt, die höheren von c^4 aufwärts aber verstärkt. Daß auch die Anspannung des Trommelfells beim negativen Valsalvaschen Versuch gegen tiefere Töne schwerhörig macht, ist schon von Wollaston[3]) beobachtet worden. Politzer[4]) erhielt das gleiche Resultat beim positiven Valsalvaexperiment und konstatierte mittels der Fühlhebelmethode, daß bei demselben eine Verringerung der Gehörknöchelchenschwingungen eintritt; nur im ersten Moment findet, entsprechend der anfänglichen Entspannung des Paukenfells, eine merkliche Vergrößerung der Exkursionen statt.

Eine Luftverdichtung im äußeren Gehörgang ist notwendig mit einer Erhöhung des Labyrinthdruckes verbunden. Beim negativen Valsalvaversuch jedoch wird zwar auch der Steigbügel ins Labyrinth gedrückt, dafür aber anderseits das runde Fenster entlastet. Wie Bezold[5]) fand, überwiegt hierbei der letztere Faktor. Beim positiven Valsalvaversuch erfahren ovales und rundes Fenster einen labyrinthwärts, das Paukenfell einen nach außen gerichteten Druck, und letzterer setzt sich wieder auf den Steigbügel als Zug fort, soweit nicht etwa die Fähigkeit des Hammers, mit dem Trommelfell ohne Mitnahme von Amboß und Stapes auswärts zu gehen, in Betracht zu ziehen ist; nach den Untersuchungen von Bezold und seinen Vorgängern gleichen sich in der Regel diese einzelnen Wirkungen so untereinander aus, daß eine Druckzunahme[6]) im Labyrinth resultiert.

d) Die Funktion der Schnecke. Die wichtigeren Hörtheorien.

Die Umsetzung der physikalischen Schallbewegung in den physiologischen Prozeß der Nervenerregung geschieht in der Schnecke, indem die Massenbewegungen des Labyrinthwassers auf das Cortische Organ und damit auf die Endausbreitung des Acusticus übertragen werden. Für die Schwingungen der Labyrinthlymphe sind unter normalen Verhältnissen lediglich die Bewegungen des Steigbügels maßgebend. Es werden zwar auch durch die Oszillationen des Trommelfelles in der Paukenhöhlenluft Verdichtungen und Verdünnungen erzeugt, und diese treffen das runde Fenster, aber die Schallwellen, welche durch letzteres ins Labyrinth gelangen könnten, werden im gesunden

[1]) Näheres hierüber s. unter anderem bei E. Bloch, Zeitschr. f. Ohrenheilk. **25**, 113 ff., 1894. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 145 f., 1882. — [3]) Philos. Transact. 1820. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 71, 1864. — [5]) Ebenda, **16**, 1 ff., 1880. — [6]) Abnorme Druckverhältnisse im inneren Ohre werden immer nach kürzerer oder längerer Zeit teils durch Regulierung seitens der Gefäße, teils durch den *Aquaeductus cochleae*, einen engen Gang in der *Scala tympani* dicht vor dem runden Fenster, der eine Kommunikation zwischen der *Scala tympani* und dem Subarachnoidealraum herstellt, beseitigt werden.

Ohre von der bedeutend größeren Kraft der Steigbügelbewegungen unwirksam gemacht [1]).

Was die Art der Erregung des Hörnerven durch die Schwingungen des Cortischen Organes betrifft, so wird man sich vorzustellen haben, daß die Härchen der Hörzellen hierbei eine vermittelnde Rolle spielen. Helmholtz und Hensen haben die Vermutung ausgesprochen, die Härchen stießen bei den Vibrationen der Basilarmembran gegen die Deckmembran, und eben dieses Anstoßen gäbe den eigentlichen Nervenreiz ab. Da es aber aus anatomischen Gründen und auch wohl physikalisch wahrscheinlicher ist, daß die Cortische Membran mit den darunter gelegenen Teilen immer gleichzeitig und gleichsinnig schwingt, so dürfte die neuerdings von E. ter Kuile [2]) geäußerte Ansicht der Wahrheit noch näher kommen. Danach können die inneren Cortischen Pfeiler an den Bewegungen der Basilarmembran so gut wie gar nicht teilnehmen, wohl aber tun dies die äußeren Pfeiler. Es findet also eine Rotation der Cortischen Bögen um den Fuß des inneren Pfeilers als Zentrum statt, womit ein seitliches Hin- und Hergleiten der Cortischen Membran auf deren Unterlage und entsprechende Beugungen der Härchen verknüpft sind, welche ihrerseits als Reiz auf die Nerven wirken.

Eine weitere Frage ist die nach dem Modus der Schallübertragung auf das Cortische Organ. Sie ist von besonderer Wichtigkeit und sozusagen der Angelpunkt aller Theorien des Hörens.

Es wäre an sich denkbar, daß die Labyrinthflüssigkeit, vor dem Druck des Steigbügels ausweichend, von der Vorhofstreppe durch das Helicotrema in die Paukentreppe hinüberflösse und umgekehrt bei einer Luftverdünnung im Gehörgang. Aber hierzu würde während der raschen Schallschwingungen keine Zeit sein und es ist viel wahrscheinlicher, daß die membranöse Scheidewand der Schnecke beim Eindringen des Steigbügels gegen die *Scala tympani* hingedrängt wird. Ihre Ausbuchtung könnte dabei ein längeres oder kürzeres Stück der Basilarmembran vom unteren Ende an betreffen oder auch an verschiedenen und mit der Art der erregenden Klangwelle wechselnden Stellen stattfinden.

Die letztere Annahme vertritt die Helmholtzsche Theorie, die auch unter dem Namen Resonanzhypothese bekannt ist, da ihr zufolge die Basilarmembran ein System von Saiten darstellt, deren jede auf einen bestimmten Ton abgestimmt ist und in Mitschwingungen gerät, wenn dieser Ton das Ohr trifft. Ähnliche Gedanken sind freilich schon öfter und lange vor Helmholtz ausgesprochen worden. Bereits Cotugno [3]) — um nur einen Namen zu nennen — meinte, die Schnecke sei mit einer Laute zu vergleichen, indem die hohen Töne mit der Basis, die tiefen mit der Kuppe perzipiert würden. Aber Helmholtz hat das Verdienst, die Hypothese am prägnantesten zum Ausdruck gebracht und wissenschaftlich am besten gestützt zu haben.

---

[1]) Bei Verknöcherung des ovalen Fensters kann das Hörvermögen teilweise erhalten sein. Inwiefern das runde Fenster in solchen Fällen an der Schallbewegung im Labyrinth beteiligt ist, ist noch durchaus nicht klargestellt. Vgl. die Übersicht über die einschlägige Literatur in der Dissertation von A. Frutiger, Über d. funkt. Bedeutung d. *Fenestra rotunda*, Wiesbaden, Bergmann, 1900. — [2]) Pflügers Arch. **79**, 146, 1900. — [3]) De aquaeductibus auris humanae internae; Anatomica dissertatio, Neapel 1760.

Daß die *Membrana basilaris* sich annähernd so verhalte, als wären ihre Radialfasern eine Reihe von nebeneinander liegenden gespannten Saiten, deren membranöse Querverbindung nur dazu diene, dem Drucke der Flüssigkeit eine Handhabe zu geben, leitete er mit Hilfe einer mathematischen Deduktion [1]) aus dem Umstande ab, daß die Grundmembran nicht nach allen Richtungen hin homogen beschaffen ist, sondern in der Längsrichtung leicht zerreißt, während die radialen Fasern einen ziemlich hohen Grad von Festigkeit haben.

Sollen nun diese Fasern nach Analogie der Klaviersaiten so abgestimmt sein, daß ihre Eigentöne eine regelmäßige Stufenfolge durch die ganze musikalische Skala bilden, so müssen für die tieferen Töne längere, für die hohen Töne kürzere Fasern vorhanden sein. In der Tat ist die Breite der Basilarmembran, also die Länge der Radialfasern, verschieden. An ihrem Anfange, dem ovalen Fenster gegenüber, ist die Membran relativ schmal. Die Breite beträgt hier nach Hensen beim Neugeborenen in 0,2625 mm Entfernung von der Wurzel 0,04125 mm und wächst bis zum Hamulus auf mehr als das Zwölffache, nämlich 0,495 mm. Es würden demnach der Helmholtzschen Theorie gemäß die höchsten Töne in der Nähe des Steigbügels, die tiefsten in der Schneckenkuppel ihren Angriffspunkt im Cortischen Organe finden.

Indessen ist die außerordentliche absolute Kürze der Fasern ein bedenklicher Punkt. Helmholtz hat zwar, um die Reaktion so kleiner Gebilde auf tiefe und tiefste Töne zu erklären, darauf hingewiesen, daß die Basilarmembran mit allerlei festen Massen, insbesondere mit dem Wasser der beiden Schneckentreppen beschwert sei, und wirklich werden ja auch schwingende Gabeln und Saiten, unter Wasser oder in eine andere Flüssigkeit gebracht, um mehrere Tonstufen bis zu einer Oktave vertieft, aber es ist zum mindesten noch unbewiesen, daß Saiten, deren Längen nur Bruchteile eines Millimeters betragen, durch irgend eine Belastung auf so tiefe Töne, wie wir sie noch zu hören vermögen, abgestimmt werden können. Hensen [2]) beobachtete, während er den Schall eines Klapphorns durch einen dem Trommelfell und den Gehörknöchelchen nachgebildeten Apparat in das Wasser eines Kastens leitete, in welchem ein Exemplar von *Mysis* befestigt war, daß einzelne der sog. Hörhaare am Schwanze dieses Tieres durch gewisse Töne des Horns zum Mitschwingen gebracht wurden. Ähnliche Resultate erhielt Alfred M. Mayer [3]) bei Versuchen, die die Fühler von *Culex Mosquito* betrafen. Aber aus dem Verhalten solcher haarartigen Organe lassen sich keine zwingenden Schlüsse auf dasjenige der Basilarmembran ziehen, zumal es durchaus fraglich ist, ob die Vibrationen der erwähnten Haare irgend etwas mit Schallempfindung zu tun haben.

Munk [4]) und Baginsky [5]) entfernten beim Hunde Teile der einen Schnecke, während die der anderen Seite völlig zerstört wurde. Die Hörprüfungen ließen sich zugunsten der Resonanzhypothese dahin deuten, daß die Exstirpation der Schneckenspitze Taubheit für tiefe Töne, die Verletzung der Basis Taubheit für hohe zur Folge habe. Gegen diese Versuche könnte

[1]) Lehre v. d. Tonempf. (5), Beilage 11. — [2]) Zeitschr. f. wiss. Zool. **13** (1863) u. Hermanns Handbuch der Physiologie **3** (2), 99 ff. u. 107 ff., 1880. — [3]) Amer. Journ. of Science and Arts **8**, Aug. 1874. — [4]) Monatsber. d. Berl. Akad., Mai 1881. — [5]) Virchows Arch. **94**, 65 ff., 1883.

man freilich verschiedene Einwände erheben, doch sind sie immerhin noch erheblich zuverlässiger als die gleichartigen Experimente an Meerschweinchen von Stepanow[1]), der sich gegen, und Corradi[2]), der sich wieder für die Helmholtzsche Theorie entschied.

Auch pathologisch-anatomische Befunde sind mehrfach zur Entscheidung über die Resonanzhypothese herangezogen worden. So fanden Moos und Steinbrügge[3]) bei der Sektion eines Patienten, der an Taubheit für hohe Töne gelitten hatte, eine Atrophie der Nervenäste der ersten Windung vor. Andere, darunter wieder Stepanow, zweifeln auf Grund ihrer Beobachtungen über Ausstoßung von Schneckenteilen an der Richtigkeit der Helmholtzschen Theorie; doch ist es fraglich, ob diese Fälle immer mit der namentlich in bezug auf die Miterregung des zweiten Ohres durch die Kopfknochenleitung nötigen Vorsicht beurteilt worden sind.

Was die Zahl der Radiärfasern in der Grundmembran anlangt, so ist sie als genügend groß für die Menge der verschieden hohen hörbaren Töne anzusehen. Sie ist beim Menschen von Retzius auf 24000, von Hensen auf 13400 geschätzt worden. Zwar würde das nach Maßgabe der Unterschiedsempfindlichkeit in der mittleren Tonregion nicht ganz ausreichen, um für jede einzelne unterscheidbare Tonhöhe eine besondere Faser verfügbar zu machen, aber es ist auch zu bedenken, daß die Unterschiedsempfindlichkeit nach den Enden der Skala, zumal nach den oberen hin sehr viel geringer ist.

Der Kernpunkt der Helmholtzschen Theorie ist also der, daß jeder einfache Ton von bestimmter Höhe nur eine ganz bestimmte Partie der Basilarmembran in Mitschwingungen versetzt und nur von den mit ihr in Verbindung stehenden Nervenfasern als Reiz aufgenommen wird. Wird ein zusammengesetzter Klang oder ein Akkord dem Ohre zugeleitet, so werden diejenigen elastischen Gebilde sämtlich erregt, deren Abstimmung den einzelnen Teiltönen entspricht, und bei genügender Aufmerksamkeit werden alle so entstehenden einzelnen Empfindungen nebeneinander wahrgenommen werden können. So erklärt die Resonanzhypothese die wichtige und bedeutungsvolle Befähigung unseres Ohres zur Klanganalyse in ebenso einfacher wie eleganter Weise, und dies darf als ihr Hauptvorzug betrachtet werden. Außerdem hat die Helmholtzsche Begründung der physiologischen Klangzerlegung den Vorteil, mit noch einigen anderen physiologischen und pathologischen Beobachtungstatsachen bestens im Einklang zu stehen.

Ich möchte in dieser Beziehung zunächst auf gewisse neuere Versuche von Exner und Pollak[4]) hinweisen. Diese Autoren gingen davon aus, daß, falls das Hören durch Resonatoren vermittelt wird, eine in dem Sinuswellenzuge eines einfachen Tones periodisch wiederkehrende Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge eine schwebungsartige Empfindung erzeugen und daß die Intensität eines derartigen Gehöreindruckes mit der Häufung der Verschiebungen mehr und mehr bis zur schließlichen Unmerklichkeit sinken müsse. Beide Annahmen wurden durch die sorgfältigen Experimente als richtig erwiesen. Auch Hensen[5]) hat kürzlich dem Sinne nach ähnliche, in der Form

[1]) Monatsschr. f. Ohrenheilk. 1888 (4). — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **32** (1891). — [3]) Zeitschr. f. Ohrenheilk. **10**, 1, 1880. — [4]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **32**, 305 ff., 1903. — [5]) Ber. d. Berl. Akad. d. Wissensch., Gesamtsitz. v. 24. Juli 1902.

allerdings von den eben erwähnten abweichende Versuche publiziert, die zu der Resonanzhypothese passen. Ferner ist hier an die mannigfachen, vorwiegend Taubstumme betreffenden, otiatrischen Beobachtungen über sogenannte Tonlücken und Toninseln zu erinnern. Wie aus der Bezeichnung hervorgeht, handelt es sich dabei um Patienten, welche bestimmte einzelne Töne oder Gruppen benachbarter Töne nicht hören, während die Perzeption für die übrigen Teile der Skala erhalten ist. Daß in dieser Weise scharf begrenzte Stücke der Tonreihe einfach ausfallen und anderseits Hörreste gleichsam wie Inseln zwischen solchen Tonlücken stehen bleiben, ist nach der Helmholtzschen Hypothese, etwa unter der Annahme circumscripter Funktionsstörungen in dem Cortischen Organe, leicht verständlich, gar nicht dagegen nach der Mehrzahl der anderen bisher bekannt gewordenen Hörtheorien, sofern dieselben nicht bloße Modifikationen der ersteren sind[1]). Das gleiche gilt von vielen Fällen subjektiver Töne[2]) und von jenen pathologischen Vorkommnissen, die unter dem Namen *Diplacusis binauralis dysharmonica* bekannt sind. Die letztere Affektion besteht darin, daß die Patienten auf dem erkrankten Ohre einzelne Töne bzw. einen kleineren oder größeren Abschnitt der musikalischen Skala falsch, nämlich höher oder tiefer als auf dem gesunden Ohre hören, so daß unter Umständen abscheuliche Dissonanzen zustande kommen. Dieses Doppelthören kann nach Jacobson[3]), dem ich hierin beipflichten möchte, seine Ursache nur in pathologischen Prozessen innerhalb des Labyrinthes haben und dürfte am einfachsten im Sinne der Helmholtzschen Theorie nach Art des folgenden schematischen Beispiels zu erklären sein. Angenommen, in dem linken Cortischen Organe sei die auf c^0 abgestimmte Faser durch Schwellung so verlängert, daß sie nunmehr auf H mitschwingt. Dann wird links ein Ton von der Schwingungszahl des H auch die c^0-Faser und deren Nerven, dessen spezifische Energie es ist, die c^0-Empfindung zu vermitteln, erregen. Links wird also c^0 gehört, rechts dagegen, wo normale Verhältnisse bestehen, nur H, so daß der faktisch einfache Ton vom Patienten als Sekunde wahrgenommen wird.

Wie steht es nun mit der Erklärung der sekundären Klangerscheinungen seitens der Helmholtzschen Resonanzhypothese?

Wenn zwei dem Ohre gleichzeitig zugeleitete Töne zusammen schweben, so ist auch die Schwingungskurve der Gehörknöchelchenkette eine Schwebungskurve. Findet aber in der Basilarmembran eine Zerlegung der Klangwelle in die beiden Teiltöne statt, die an sich ohne Amplitudenschwankungen schwingen, so könnte man erwarten, daß die beiden Primärtöne glatt nebeneinander hinfließend gehört würden. Allein eine solche Erwartung wäre nur gerechtfertigt unter der Voraussetzung, daß die in Frage kommenden beiden Resonatoren im Ohre völlig isoliert wirkten. Diese Annahme macht jedoch Helmholtz nicht. Er betont vielmehr ausdrücklich, daß nach seiner Auffassung ein Ton nicht nur eine einzelne Faser errege, sondern daß auch deren Nachbarn beiderseits, allerdings in rasch mit ihrem wachsenden Abstande abnehmender Stärke, zum Mitschwingen kämen. Jeder von außen anlangende

[1]) Vgl. hierzu unter anderen Bezold, Münchener med. Wochenschr. 19 u. 20 (1900). — [2]) Vgl. Stumpf, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 21, 100 ff., 1899. — [3]) Jacobson u. Blau, Lehrb. d. Ohrenheilk., Leipzig 1902.

Ton versetzt hiernach innerhalb der Basilarmembran eine Zone von gewisser Breite in Oszillationen, und beim Zusammenklange zweier einander nahe genug liegender Töne fallen die beiden Zonen zum Teil übereinander. In der gemeinschaftlichen Mittelzone schwingen die Basilarfasern gleichzeitig in dem Rhythmus beider Primärtöne, beschreiben also keine Sinuskurve sondern eine Klangkurve, eine Schwebungskurve; die zugehörigen Nerven werden abwechselnd stärker und schwächer erschüttert, und eben dies gibt die Veranlassung zu jenem Schwanken der Empfindungsintensität, welches mit dem Ausdruck „Schweben" bezeichnet wird. Sind die Primärtöne der Höhe nach nur sehr wenig verschieden, so decken sich die Zonen fast ganz. Man vernimmt dann wirklich auch nur eine einzige Tonhöhe und diese schwebend. Rücken die Primärtöne weiter auseinander, so müssen der Theorie nach die Schwebungen auf eine mehr oder weniger schmale Zwischenzone beschränkt sein und die von den Primärtönen maximal erregten Fasern mit gleichförmiger Amplitude schwingen. Daß die Beobachtungstatsachen hier mit der Helmholtzschen Hypothese übereinstimmen, hat Stumpf in seiner Tonpsychologie[1]) gezeigt. Man hört die Primärtöne ruhend und einen dritten, zwischen ihnen gelegenen, innerhalb des Ohres lokalisierten, weichen Ton, den Stumpf Zwischenton[2]) nennt, schwebend. Erreicht das Intervall der Primärtöne (in der ein- bis dreigestrichenen Oktave) ungefähr eine große Sekunde, so wird der Zwischenton meist undeutlich oder unhörbar. In diesem Falle und bei weiterer Zunahme der Höhendifferenz der Primärtöne wird auch der Resonanzhypothese gemäß die gemeinschaftliche Mittelzone so schmal, daß sie zur Wahrnehmung eines selbständigen Zwischentones nicht mehr ausreicht. Die Intensitätsschwankungen werden zwar noch empfunden, aber in der Beurteilung des Klangganzen an die Primärtöne selbst geknüpft bzw., wie Stumpf fand, an denjenigen von ihnen, auf welchen sich gerade die Aufmerksamkeit richtet. Daß jenseits einer gewissen Distanzgrenze der Primärtöne die Schwebungen wieder verschwinden, erklärt sich nach Helmholtz einfach daraus, daß dann die beiden Zonen keine Gemeinschaft mehr miteinander haben.

Der Umstand, daß in der viergestrichenen Oktave noch Töne zusammen schweben, deren Höhenunterschied mehr als 400 Schwingungen beträgt, zwingt zu der Annahme, daß hohe Töne die Basilarmembran in verhältnismäßig auffallender Breite erregen. Eine prinzipielle Schwierigkeit für die Helmholtzsche Theorie dürfte hierin aber kaum zu erblicken sein. Schlimmer wäre es, wenn R. Koenigs[3]) Behauptung, die Schwebungen tiefer Töne seien bis zum Intervall 1 : 10 bzw. 1 : 14 zu verfolgen, sich als richtig erwiesen hätte. Sie beruht jedoch auf einem Irrtum, der auf die Nichtbeachtung der Mitwirkung von Obertönen zurückzuführen ist. Schaltet man die in Frage kommenden Obertöne durch Interferenz aus, so fallen auch die betreffenden Schwebungen weg[4]).

R. Koenig ist überhaupt mehrfach als ein scharfer, obschon nicht glücklicher Gegner der Resonanzhypothese aufgetreten. Es war bereits früher

[1]) **2**, 480 ff., 1890. — [2]) Melde hat später diese Töne als resultierende Töne bezeichnet. (Sitzungsber. d. Marburger Naturw. Gesellsch., Nov. 1893; Pflügers Arch. **60**.) — [3]) Pogg. Ann. **157**, 177 ff., 1876 und Wiedemanns Ann. **12**, 335, 1881. — [4]) C. Stumpf, Wiedemanns Ann. **57**, 680, 1896.

davon die Rede, daß er vergeblich versucht hat, die Einflußlosigkeit der Phasenverhältnisse der Teiltöne eines Klanges auf die Qualität seines Eindruckes, die eine notwendige Konsequenz der Helmholtzschen Theorie ist, zu widerlegen. Auch gehörte er [1]) zu denjenigen Autoren, die mit Nachdruck dafür eingetreten sind, daß das Ohr die Fähigkeit besitze, Schwebungen und regelmäßige Unterbrechungen eines Tones bei genügender Frequenz als einen Ton von entsprechender Schwingungszahl aufzufassen; eine Fähigkeit, die in direktem Widerspruche mit der Resonanzhypothese stehen würde, da dieser zufolge nur solche Töne aus einem Klange herausgehört werden können, die darin als pendelförmige Komponenten enthalten sind.

Was die sog. Unterbrechungstöne betrifft, so ist weiter oben [2]) gezeigt worden, daß sie entweder physikalischen Ursprungs oder Differenztöne sind. Sie bieten daher an sich keinerlei Veranlassung zu Einwänden gegen die Helmholtzsche Theorie und würden wohl nie als Grundlage zu solchen benutzt worden sein, wenn schon die ersten Beobachter sich die Mühe gemacht hätten, ihre Natur exakt aufzuklären.

Ebenso steht es mit den Kombinationstönen. Es ist eine alte Ansicht, daß die Schwebungen bei zunehmender Schnelligkeit in den Differenzton übergingen. Schon Lagrange und Young haben dieselbe vertreten, und R. Koenig hat sie in seinen eben erwähnten Untersuchungen wieder aufgenommen, indem er behauptete, die Schwebungen erzeugten bei einer gewissen Geschwindigkeit ebenso einen Ton wie die einzelnen Schläge eines Kartenblattes oder eines Holzbrettchens gegen ein rotierendes Zahnrad. Aber dieser Analogiebeweis ist völlig hinfällig. Der Ton, den die auf dem Zahnrade schleifende Karte hervorruft, entsteht gar nicht aus jenen Schlägen, sondern aus der mehr oder weniger pendelähnlichen Schwingungsbewegung, welche das vibrierende Kartenblatt der umgebenden Luft erteilt. Das Zahn für Zahn sich wiederholende Anschlagegeräusch ist eine für die Tonbildung ganz unwesentliche Nebenerscheinung, wie schon daraus hervorgeht, daß der Ton um so deutlicher wird, je leiser das Anstoßen der Karte an die Zähne vor sich geht. Betrachtet man ferner eine größere Anzahl Zweiklangkurven, so zeigen wohl Zweiklänge vom Intervall $n : n + 1$ schöne regelmäßige Schwebungswellen, die einen Augenblick zu der Annahme verleiten könnten, jede Schwebungskuppe wirke gleichsam wie ein einzelner Stoß auf den Steigbügel; die meisten Kurven von anderen Intervallen lassen uns jedoch im Zweifel, ob und welche Differenztöne man aus ihrer Form herauslesen soll, und das etwaige Ergebnis steht nicht immer im Einklang mit der Beobachtung [3]). Helmholtz hat denn auch die Entstehung von Differenztönen aus Schwebungen ausdrücklich abgelehnt und auf Grund einer mathematischen Deduktion [4]) die Hypothese aufgestellt, daß das Trommelfell und seine Adnexa als der Ursprungsort der subjektiven Kombinationstöne anzusehen seien. Daß diese Hypothese das Richtige trifft, davon habe ich mich durch eine demnächst [5]) zu veröffentlichende experimentelle Untersuchung überzeugt, welche, wie schon erwähnt, ergeben hat, daß Telephonmembranen und Membranen

---

[1]) Pogg. Ann. 157 (1876). — [2]) Siehe Abschnitt III c. — [3]) Vgl. hierzu meine Abhandlung in Pflügers Arch. 78, 505, 1900. — [4]) Lehre von den Tonempfindungen, Beilage 12. — [5]) Voraussichtlich in Pflügers Arch. f. Physiol. 1905.

von der Form des Trommelfelles, wenn sie von zwei Primärtönen zugleich in Schwingungen versetzt werden, auch objektive, Resonatoren erregende, Kombinationstöne hervorbringen. Die physikalische Begründung dieser Kombinationstöne muß freilich eine andere als die von Helmholtz für das Trommelfell versuchte sein. Denn letztere setzt, von anderen Schwierigkeiten abgesehen, eine Amplitude der Primärtöne als nötig voraus, welche so groß ist, daß auch noch das Quadrat der Verschiebungen auf die Bewegungen Einfluß erhält, während in Wirklichkeit selbst verklingende Primärtöne gut hörbare Differenztöne hervorzurufen vermögen. Dennert[1]) hat angegeben, daß auch Personen ohne Trommelfell und solche, bei denen von der ganzen Gehörknöchelchenkette nur der Steigbügel erhalten ist, Kombinationstöne hören können, und von anderer Seite sind mir dies bestätigende, allerdings bisher nicht publizierte, Beobachtungen mitgeteilt. Diese Fälle dürften damit zu erklären sein, daß bei den betreffenden Individuen eben die Membran des runden Fensters ausreicht, um, nach Analogie der Telephonmembranen wirkend, Kombinationstöne zu erzeugen.

Wundt[2]) hat, um die Differenztöne zu erklären, unter Aufgabe des Prinzips von der spezifischen Energie der einzelnen Acusticusfasern die Hypothese aufgestellt, daß jeder Ton auf einem doppelten Wege ins Zentralorgan und damit zum Bewußtsein gelange. Erstens soll derselbe der Helmholtzschen Resonanzhypothese gemäß vom Cortischen Organe aufgenommen und zweitens durch die Kopfknochen direkt auf den Stamm des Acusticus übertragen werden, wobei jede Faser des letzteren jeden Ton leiten kann. Treffen nun zwei Primärtöne innerhalb einer und derselben Nervenbahn zusammen, so interferieren sie und dadurch kommt es zur Wahrnehmung der Schwebungen bzw. Kombinationstöne. Diese Annahme setzt zunächst voraus, daß der Acusticusstamm durch Schall erregbar sei. In der Tat ist das schon von Joh. Müller wie etwas Selbstverständliches ausgesprochen und neuerdings wieder von J. R. Ewald (1890) behauptet worden auf Grund der Beobachtung, daß labyrinthlose Tauben unter Umständen auf Schall mit Bewegungen reagieren. Die Nachprüfung seiner Befunde durch andere Physiologen[3]) hat aber ergeben, daß diese Reaktionen selbst dann noch stattfinden, wenn der Acusticus längst degeneriert ist, und daß sie auf taktiler Empfindung des Schalles, wie sie auch bei absolut tauben und taubstummen Menschen vorkommt, beruhen. Was ferner die cerebrale Entstehung von Schwebungen und Differenztönen betrifft, so ist sie mehr als unwahrscheinlich. Daß wir die Schwebungen zweier, selbst sehr leiser Töne auch dann noch hören, wenn der eine nur das rechte, der andere nur das linke Ohr von außen erregt, erklärt sich genügend daraus, daß jeder der Töne durch die Kopfknochen auch auf das zweite Ohr übertragen wird[4]). Hierfür brauchen wir eine Interferenz von Tonerregungen im Zentralorgan nicht zu postulieren. Wenn es anderseits eine solche wirklich gäbe, wäre nicht zu begreifen, warum bei diotischer Verteilung zweier Primärtöne raschere Schwebungen

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **24** (1887). — [2]) Philos. Stud. **8**, 641, 1893; vgl. aber auch die modifizierte Darstellung in Wundts Grundz. d. Physiolog. Psychолog. (5), **2**, 137, 1902. — [3]) Vgl. die Darstellung der interessanten Polemik bei M. Kamm, Klin. Vortr. a. d. G. d. Otologie u. Pharyngo-Rhinologie **3**, 91, Jena 1899. — [4]) Vgl meine Abhandlung in Pflügers Arch. **61**, 544, 1895.

und Differenztöne nur unter ganz besonderen Versuchsbedingungen gehört werden[1]); auch müßte man dann erwarten, daß zwei subjektive Töne oder ein subjektiver und ein objektiver bei passendem Verhältnis der Schwingungszahlen zusammen schweben. Das ist aber nach den Beobachtungen von Stumpf[2]) und Urbantschitsch[3]) nicht der Fall, und die vereinzelten Ausnahmen dieser Regel, die Wundt[4]) anführt, können ihre Ursache in einer Interferenz innerhalb des Cortischen Organes haben. Die Wundtsche Erweiterung der Resonanzhypothese entbehrt also der tatsächlichen Stützen.

L. Hermann war zeitweilig[5]) der Meinung, es wäre nötig, die Helmholtzsche Theorie, so elegant sie sei, fallen zu lassen und dem Ohre die Eigenschaft zuzuschreiben, jede Periodik als Ton zu empfinden. Später[6]) kehrte er im Prinzip zur Resonanztheorie zurück, fügte aber als Ergänzung die Hypothese hinzu, daß jeder Resonator des Cortischen Organes auf seine Acusticusfaser nur durch Vermittelung einer besonders gearteten Nervenzelle, einer „Zählzelle", wirke. Diese Annahme hatte den speziellen Zweck, die „Intermittenztöne" zu erklären. Seit aber gezeigt ist, daß die letzteren entweder physikalisch entstehen oder Differenztöne sind, ist die „Zählzellen"-hypothese überflüssig geworden. Die Kombinationstöne wollte Hermann darauf zurückführen, daß die Schwingungsformen der Primärtöne zu einer Resultierenden verschmelzen, welche einer Pendelschwingungsform genügend ähnlich sei, um einen selbständigen „Mittelton" zu geben. Dieser Versuch ist jedoch schon insofern mißglückt, als es Hermann selbst nicht recht und anderen gar nicht gelungen ist, die Existenz solcher Mitteltöne zu verifizieren.

Ebbinghaus[7]) hält den allgemeinen Grundgedanken der Helmholtzschen Theorie, die Auffassung der Basilarmembran als eines Resonatorenapparates, für durchaus unanfechtbar, sieht aber die spezifischen Energien der nervösen Elemente für nicht so weitgehend gesondert an, wie es bei Helmholtz geschieht. Ein Ton von der Schwingungszahl n vermag nach ihm auch die auf die Untertöne $\frac{1}{2}\,n$, $\frac{1}{3}\,n$, $\frac{1}{4}\,n$ usw. abgestimmten Fasern in Mitschwingungen zu versetzen, wobei dieselben unter Bildung von Knotenpunkten Teilschwingungen vollführen, und die zugehörigen Nerven tragen dann alle mit zu der Empfindung des Tones n bei. Erklingt nun beispielsweise eine große Terz, also zwei Töne vom Intervall 4 : 5, so wird auch das auf 1 abgestimmte Gebiet der Basilarmembran von beiden Rhythmen zugleich zu Teilschwingungen veranlaßt. Dabei aber kommt die objektive Bewegung in jeder Schwingungsperiode einmal durch Interferenz nahezu zum Stillstand, und die beteiligten nervösen Elemente erleiden somit gerade in dem ihnen bestgeläufigen Rhythmus 1 starke Gegensätze von Reizung und Ruhe: sie reagieren mit dem Differenztone 1. Ebbinghaus bringt außer diesem Paradigma noch einige andere zur Erläuterung seiner Auffassung von der Entstehung der sekundären Klangerscheinungen bei. Dieselbe ist allerdings

---

[1]) Vgl. meine Abhandlung in Pflügers Arch. **61**, 544, 1895. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **21**, 117 ff., 1899. — [3]) Pflügers Arch. **24**, 22, 1881. — [4]) Grundz. d. Physiol. Psychol. (5), **2**, 108, 1902. — [5]) Pflügers Arch. **49**, 499 ff. — [6]) Ebenda **56**, 467, 1894. — [7]) Grundzüge d. Psychol. **1**, 317 ff., Leipzig 1902.

nicht frei von prinzipiellen Schwierigkeiten, weshalb denn auch Ebbinghaus selbst es für nötig gefunden hat, gewisse Hilfshypothesen zu machen.

Ich gehe aber darauf nicht näher ein, weil die Ebbinghaussche ebenso wie die Hermannsche Theorie der Kombinationstöne durch meinen oben erwähnten Nachweis der physikalischen Entstehung dieser Töne im Mittelohre inzwischen gegenstandslos geworden ist.

Von denjenigen Akustikern, welche die Helmholtzsche Resonanzhypothese völlig über Bord werfen wollen, sei hier zuerst Max Meyer[1]) genannt. Nach ihm vollzieht sich die Klanganalyse im Ohre in der Weise, daß, vom unteren Ende der Schneckentreppe angefangen, je nach der objektiven Klangstärke ein kürzeres oder längeres Stück der Basilarmembran in Schwingungen gerät, wobei es sich in mehrere verschieden schnell oszillierende Abteilungen teilt. Jede Abteilung entspricht einem Tone. Ihre Länge bedingt die Intensität ihre Schwingungsfrequenz die Tonhöhe der Empfindung. Diese Theorie stimmt in einigen Fällen vortrefflich mit der Beobachtung überein, in anderen nicht. Sie hat das Verdienst, auf manche interessante Fragen zu führen, ist aber, abgesehen von ihrer skizzenhaften Form, zu einseitig auf die Erklärung der Klanganalyse sowie der Differenztöne berechnet und nimmt zu wenig auf andere wichtige Dinge Rücksicht, als daß sie irgendwie wirksam mit der Resonanzhypothese konkurrieren könnte. Ähnliches ist von der Theorie E. ter Kuiles[2]) zu sagen. Sie geht davon aus, daß der Steigbügel bei der Vorwärtsbewegung ein gewisses Quantum Lymphe vor sich herschiebt und dabei eine gewisse Strecke der Basilarmembran ausbuchtet. Diese Strecke ist um so länger, je größer die Schwingungsdauer, also je tiefer der Ton ist: die Länge der Vorwölbungsstrecke der Basilarmembran ist für die Tonhöhe der Empfindung maßgebend. Ist neben einem tieferen Tone noch ein höherer vorhanden, dem ein kürzeres Stück der Basilarmembran entspricht, so ändert sich der Modus der Gesamterregung des Nervenendapparates und damit die Wahrnehmung die Klangfarbe. Wie aber bei solcher Überlagerung der Töne in der Basilarmembran eine präzise Klanganalye möglich ist, dies gerade geht aus ter Kuiles Ausführungen nicht mit der wünschenswerten Klarheit hervor. Die übrigen Probleme des Hörens werden darin höchstens flüchtig gestreift.

Während Meyer und ter Kuile vorwiegend den Anfangsteil der Basilarmembran für die Schallbewegung im Labyrinth in Anspruch nehmen, vertritt J. Rich. Ewald[3]) die Anschauung, daß ein Ton, der das Ohr trifft, die ganze Basilarmembran in Mitschwingungen versetzt, indem sie in eine Reihe stehender Wellen zerlegt wird. Die Gesamtheit dieser Wellen, das Schallbild, wie Ewald es nennt, löst durch Vermittelung der Acusticusfasern im Gehirn die Tonperzeption aus. Jedem Tone entspricht ein für ihn charakteristisches Schallbild, und die einzelnen Schallbilder unterscheiden sich voneinander durch die größere oder geringere Wellenlänge der stehenden Schwingungen. Sind mehrere gleichzeitig vorhanden, so findet zwar eine Superposition, aber keine Änderung der Wellenlängen statt, so daß jedes Schall-

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **16**, 1 und **17**, 1, 1898; auch Pflügers Arch. **78**, 346, 1899 und **81**, 61, 1900. — [2]) Pflügers Arch. **79**, 484, 1900. — [3]) Ebenda **76**, 147, 1899 und **93**, 485, 1903.

bild für sich genügend kenntlich bleibt. Auf diese Weise wird die Klangzerlegung möglich. Alle Schallerregungen, bei denen irgendwie die Bildung stehender Wellen verhindert wird, nehmen den Charakter des Geräusches an. Diese Theorie ist eine Konsequenz der Tatsache, daß es Ewald gelungen ist, ihr entsprechende Schallbilder und Schallzerlegungsbilder auf schlaff gespannten, mit Öl bestrichenen Gummimembranen, die teils durch Stimmgabeln, teils durch einen besonderen Schwingungsapparat in Vibrationen versetzt wurden, sichtbar zu machen. Auch in Wasser befindliche Membranen sind dazu geeignet und die Spannungsverhältnisse der Basilarmembran für die Theorie günstig. Um die Eigentümlichkeiten des Ohres möglichst getreu nachzubilden, hat Ewald neuerdings eine Membran von nur 0,55 mm Breite und 8,5 mm Länge hergestellt. Auf ihr ließen sich Töne beobachten im Umfange von sechs Oktaven. Der mittelste Ton, von dessen Wellen Ewald seiner zweiten Publikation ein Photogramm beigegeben hat, war a^1, der tiefste sichtbare h^1. Theoretisch hätte die Membran indessen noch F zeigen können. Immerhin liegt selbst diese Grenze reichlich zwei Oktaven über dem unteren Ende der menschlichen Tonperzeption, und es bleibt noch zu beweisen, daß die Schallbildertheorie imstande ist, auch die tiefsten Tonempfindungen zu erklären. Die Erregung der Membran gelingt ebensowohl in der Luft — es genügt, eine tönende Galtonpfeife in ihre Nähe zu bringen — wie in der von Ewald konstruierten Camera acustica. Letzterer Apparat, ein Ohrmodell, ist ein ganz mit Wasser gefüllter Kasten, der zum Zweck der Beleuchtung und mikroskopischen Betrachtung der Membran Glaswände hat. Der Innenraum ist durch eine passend gebogene, die Schallbildermembran aufnehmende Scheidewand in zwei Teile, die die *Scala vestibuli* und die *Scala tympani* repräsentieren, zerlegt. In der einen Hälfte ist eine *Fenestra rotunda* angebracht, in der anderen eine das ovale Fenster vertretende Membran, die durch eine „Columella“ mit der Membran eines Schalltrichters („Trommelfell und Gehörgang“) verbunden ist. Bringt man eine Tonquelle vor den Schalltrichter, so gerät die Schallbildermembran alsbald in Schwingungen; ebenso wenn man, um die direkte Knochenleitung nachzuahmen, den Stiel einer klingenden Gabel unmittelbar auf eine Wand der Camera aufsetzt. Die elegante Demonstrierbarkeit der Schallbilder gibt der Ewaldschen Theorie unzweifelhaft insofern ein Übergewicht über die Helmholtzsche, als es bisher nie gelungen ist und vielleicht nie gelingen wird, an einer Membran von der Art der Basilarmembran solche Schwingungen zu beobachten, wie sie von der Resonanzhypothese gefordert werden. Auch ist der Umstand für Ewalds Hörtheorie entschieden günstig, daß dieselbe die wichtige Tatsache des Vorkommens von Toninseln und Tonlücken in sehr einfacher Weise erklären würde. Ewald teilt in dieser Hinsicht mit, daß er öfter Membranen gefunden habe, die infolge kleiner Unregelmäßigkeiten in ihrem Bau auf gewisse Schwingungszahlen nicht ansprachen, während die nächst höheren und nächst tieferen Töne tadellose Wellenbilder lieferten. Aber ein abschließendes Urteil über die Theorie ist nicht möglich, bevor sie nicht eine weitere Ausgestaltung erfahren hat. Sie muß unter anderem noch an vielen einzelnen Tatsachen aus der Lehre von der Klanganalyse und den Schwebungen, die Ewald bis jetzt noch gar nicht in Beziehung zu seiner Hypothese gebracht oder nur kurz berührt hat, eingehend erprobt werden.

e) Kopfknochenleitung. Diotisches Hören. Schalllokalisation.

Die Kette der Gehörknöchelchen bildet nicht den einzigen Weg, auf dem Schall zum inneren Ohre gelangen kann. Wir hören nicht bloß durch Luftleitung, wie man kurzweg die durch den Paukenhöhlenapparat vermittelte Übertragung von Schallschwingungen aus der Luft auf das Labyrinth nennt, sondern auch durch Knochenleitung (cranio- oder osteotympanale Leitung), und zwar kann die letztere entweder eine direkte oder indirekte sein. Von einer direkten Kopfknochenleitung spricht man, wenn die Schallquelle unmittelbar ihre Schwingungen an den Schädel abgibt, wenn also beispielsweise bei der Untersuchung eines Ohrenkranken eine Stimmgabel auf den Scheitel oder auf den Warzenfortsatz hinter der Ohrmuschel aufgesetzt wird. Um indirekte Knochenleitung handelt es sich dagegen, wenn in der Luft vorhandene Tonwellen den Kopf treffen, in ihn eintreten und so zur Basilarmembran dringen. Theoretisch betrachtet ist die gewöhnliche Luftleitung stets mit indirekter Knochenleitung verbunden. Denn die Schallwellen werden außer der Gehörgangsöffnung immer auch die diese umgebenden Partien des Schädels erreichen oder aus der Luft im Gehörgang auf dessen Wandungen übergehen können.

Setzt man den Stiel einer nicht allzu leise tönenden Stimmgabel auf irgend einen Punkt des Kopfes, so pflanzt ihr Ton sich mit größerer oder geringerer Stärke zu beiden Felsenbeinen fort und wird diotisch vernommen, wobei die Empfindung des rechten Ohres mit der des linken in der Wahrnehmung zu einer einzigen verschmilzt, wie es immer bei gleichzeitigen qualitativ identischen Gehörseindrücken der Fall ist. Gewisse Partien des Schädels, wie die Wangenmuskulatur und die Nasenspitze, leiten den Schall schlecht. Auf dem Warzenfortsatz tönt die Gabel länger. Ist der Ton auch hier verklungen, so wird er wieder hörbar, wenn man die Gabel vor das Ohr bringt, also Luftleitung anwendet. Diese Tatsache ist in der Ohrenheilkunde als Rinnescher Versuch bekannt und diagnostisch wichtig. Hensen[1]) gibt an, daß eine ziemlich dicht an das Ohr gehaltene und eben nicht mehr gehörte Gabel wieder vernehmlich wird, wenn man ihren Stiel gegen die Zähne drückt. Dies ist richtig, sofern man den Ausdruck „ziemlich" beachtet. Dagegen finde ich bei Benutzung meiner a^1-Gabel, daß dieselbe, nachdem sie bei geöffneten Lippen und geschlossenen Kiefern von den oberen Schneidezähnen aus abgeklungen ist, noch deutlich und relativ andauernd tönt, wenn ich die Zinkenspitzen dem Ohreingange so weit, als es irgend möglich ist, nähere. Stelle ich dasselbe Experiment mit geöffneter Mundhöhle an, so ist das Überwiegen der Luftleitung über die Knochenleitung unsicher, was damit zusammenhängt, daß die auf die oberen Schneidezähne gesetzte a^1-Gabel lauter und länger klingt, wenn der Mund offen ist, als wenn die Zähne zusammengebissen werden. Ist der Ton einer auf dem Scheitel stehenden oder mit den Zähnen gefaßten Gabel unhörbar geworden, so tritt er wieder auf, wenn die Ohren verstopft werden, und ist er dann abermals verklungen, so kann man

[1]) Physiologie des Gehörs in Hermanns Handbuch der Physiologie 3 (2), 26, 1880.

ihn noch vernehmen, wenn der Stiel der Gabel in den Gehörgang hineingeschoben wird [1]).

Für die Lokalisation des Tones einer mit dem Ende ihres Stieles irgendwo auf dem Schädel ruhenden Gabel ist der Satz maßgebend, daß wir einen diotisch vernommenen Schall nach der Seite des stärker erregten Ohres verlegen. Es ist dies durchaus nicht immer die Seite, auf welcher sich die Gabel befindet. Vielmehr wird eine auf die oberen Partien der rechten Kopfseite aufgesetzte Gabel, soweit die bisherigen Beobachtungen der Autoren einen Schluß gestatten, in der Regel links gehört und umgekehrt. Liegt die Ansatzstelle der Gabel in der den Kopf vertikal von vorn nach hinten halbierend gedachten Medianebene, so wird der beide Hörnerven gleich stark erregende Ton nach Kessel [2]) von jugendlichen Personen in die Ohren projiziert, im mittleren Lebensalter in die Medianebene und zugleich in die Ohren, von älteren Leuten in die Medianebene bzw. an die Ansatzstelle; doch kommen hierbei viele individuelle Verschiedenheiten vor.

Setzt man eine klingende Gabel median auf den Kopf einer Versuchsperson und läßt dieselbe das eine Ohr mit dem Finger oder durch Andrücken der Hohlhand verschließen, so rückt der Ton unter Zunahme seiner Intensität in dieses hinein. Werden beide Ohren in gleicher Weise geschlossen, so erscheint der Ton in der Medianebene im Innern des Schädels. In Ermangelung einer anderen Tonquelle kann man sich hiervon überzeugen, indem man einen Vokal, am besten *u*, singend die Ohren abwechselnd lose verstopft und wieder öffnet. Auch der Ton einer mit dem Stiel gegen die rechte Schläfe gedrückten Gabel, der für gewöhnlich, wie eben erwähnt, links gehört wird, springt sofort in das rechte Ohr, wenn man die Hand auf dessen Muschel legt.

E. H. Weber [3]) hat zuerst ausdrücklich auf das Hineinwandern eines durch die Kopfknochen zugeführten Tones in das verschlossene Ohr aufmerksam gemacht, weshalb diese Beobachtung auch der Webersche Versuch genannt wird. Für das Verständnis desselben ist es nötig, sich daran zu erinnern, daß die Gehörknöchelchenkette auch bei der direkten Kopfknochenleitung in Schwingungen versetzt wird. Die Oszillationen des Trommelfells werden dabei ebenso wie diejenigen der Gehörgangswände auf die Luft im Meatus übertragen, und so fließt der Ton einer auf den Schädel gesetzten Gabel aus den Ohren nach außen ab, wovon man sich durch geeignete Auskultationsmethoden ohne Mühe überzeugen kann. Nach Mach [4]) wird nun durch einen leichten Verschluß des Gehörganges dieser Schallaustritt gehindert und daher das durch die Differenz von Zu- und Abfluß bestimmte Quantum Schallenergie in dem verstopften Ohre größer als in dem offenen, was eben in einer Verstärkung des Tones auf der Seite des ersteren zum Ausdruck kommt. Verschiedene andere Forscher haben den Weberschen Versuch auf eine Intensitätszunahme infolge von Reflexion der Tonwellen an der den Ohreingang obturierenden Fläche zurückzuführen versucht. Machs Erklärung scheint

---

[1]) Vgl. hierzu Rinne, Prager Vierteljahrsschrift f. prakt. Heilkunde **1**, 71 ff., 1855 und Zeitschr. f. rationelle Medizin, 3. Reihe, **24**, 26, 1865, sowie Hensen a. a. O., der eine Gabel von 1000 Schwingungen an den Zähnen 4″, bei Schluß des Ohres weitere 4″ und nach Einführung in den Gehörgang noch 1″ bis 3″ hörte. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 130, 1882. — [3]) De pulsu, auditu et tactu, Lips. 1834, p. 41. — [4]) Berichte d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **48** (2), 283, 1863.

mir indessen, von theoretischen Erwägungen abgesehen, schon aus experimentellen Gründen den Vorzug zu verdienen. Es ist nämlich von mehreren Seiten festgestellt und leicht zu bestätigen, daß die Tonverstärkung beim Weberschen Versuch besonders deutlich ist, wenn das Ohr nur lose verschlossen wird, dagegen merklich nachläßt, wenn man den Finger tief und fest einführt. Nach der Reflexionstheorie ist dies nicht recht verständlich, wohl aber nach der Machschen Auffassung, insofern der feste Verschluß den Schallabfluß durch den Finger hindurch wieder begünstigt. Zweitens tritt die Verlegung eines median und osteo-tympanal zugeleiteten Tones in eines der Ohren auch ohne jede Veranlassung zu einer Reflexion bei solchen Mittelohrkrankheiten auf, welche die Schwingungen der Knöchelchenkette oder des Trommelfells und damit die Abgabe von Schall nach außen beeinträchtigen; weshalb denn auch der Webersche Versuch in der otiatrischen Diagnostik eine wichtige Rolle spielt. Übrigens bedürfen die bei demselben in Betracht kommenden Verhältnisse im einzelnen noch der genaueren Untersuchung und gewisse Widersprüche der Aufklärung. So finde ich in Übereinstimmung mit einer gelegentlichen Angabe von Politzer, daß der Ton meiner auf die Schneidezähne gesetzten a^1-Gabel jedesmal lauter wird, sobald ich durch Tensoranspannung die Schwingungen des Paukenapparates verringere. Bei dem oben schon erwähnten Gelléschen Versuch dagegen, bei dem statt des Zuges von innen ein Druck von außen auf das Paukenfell wirkt, tritt das Gegenteil ein, während wiederum das negative ebenso wie das positive Valsalvasche Experiment bei vielen, aber nicht bei allen Personen das Webersche Phänomen hervorruft.

Hält eine Versuchsperson eine tönende Gabel, ohne irgendwie den Kopf damit zu berühren, vor ihr eines Ohr, so kann man, mittels Stethoskops verschiedene Partien des Schädels auskultierend, an der ganzen Oberfläche des Kopfes den Ton hören. Versuche dieser Art sind schon von Harleß[1]) angestellt und später unter anderen von Mader[2]) mittels seines sehr fein reagierenden Otomikrophons bestätigt, ja sogar für sehr leise Schallquellen gültig gefunden worden. Die Auskultation ergibt ferner, daß der aus der Luft von dem einen Ohre aufgenommene Ton auch zum anderen gelangt und aus demselben mit merklicher Stärke herausklingt. Für diese Hinüberleitung sind zwei Wege vorhanden. Einerseits können die Tonwellen aus der Luft direkt auf die Kopfknochen übergehen und von ihnen an alle Teile beider Ohren abgegeben werden; anderseits können das Trommelfell, das ovale Fenster, das runde Fenster sowie das Labyrinthwasser des zuerst erregten Ohres durch ihre Vibrationen die Kopfknochen in Mitschwingungen versetzen, und alle gleichnamigen Stücke des anderen Ohres können diese von Felsenbein zu Felsenbein geleiteten Oszillationen aufnehmen. Ich möchte die letztere Art der intrakraniellen Schallfortpflanzung kurz als metotische Knochenleitung bezeichnen. Nach Harleß darf man derselben freilich keinen allzugroßen Anteil an der Schallübertragung zuschreiben. Denn wenn er an der Leiche das eine Ohr auskultierte, während in der Luft vor dem anderen eine Gabel klang, so war die Intensität nach der Zerstörung beider Trommelfelle

[1]) Wagners Handwörterbuch der Physiologie **4**, 361 f., 1853. — [2]) 13. Intern. med. Kongreß, Paris 1900 und Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **109** (3), 1900.

nicht auffallend geringer als vorher. Dagegen fand er bei anderen Versuchen, daß die Schädelknochen überraschend leicht Schall aus der Luft aufnehmen und weiter leiten. (Leider fehlt die nicht unwichtige Angabe über die Höhe der benutzten Töne.)

Jedenfalls ist sicher, daß durch die indirekte Kopfknochenleitung selbst sehr schwache Töne auch zu dem von der Schallquelle entfernteren Gehörorgan gelangen. Man nähere eine Stimmgabel dem einen Ohre so weit, daß ihr Abstand noch etwas geringer ist als die Distanz der Ohren, warte, bis sie verklungen, und führe sie hierauf möglichst dicht an die Gehörgangsöffnung. Sie wird dann wieder hörbar, aber ihr Ton kann das andere Ohr nicht mehr auf dem Wege durch die Luft außen um den Kopf herum erregen, was natürlich bei Experimenten dieser Art immer sorgfältig vermieden werden muß. Wenn man nun das zweite Ohr lose mit dem Finger schließt, so wird der Ton alsbald lauter und scheint dem Kopfe näher zu kommen. Wird der Finger wieder entfernt, so wird der Ton wieder leiser und rückt scheinbar vom Ohre weg. Diese Beobachtung, welche sich mit allerdings allmählich abnehmender Deutlichkeit bis nahe zum völligen Erlöschen des Klanges verfolgen läßt, ist nichts anderes als eine Modifikation des Weberschen Versuchs, und beweist, daß auch das zweite Ohr durch den Kopf [1]) hindurch erregt wird. Sie ist früher von mir [2]) in etwas anderer Form angestellt und inzwischen von verschiedenen Seiten bestätigt worden, so von E. Bloch [3]), der zugleich ihre Bedeutung für die Ermittelung einseitiger kompletter Taubheit anerkannt hat.

Leitet man von zwei der Höhe nach wenig verschiedenen Tönen den einen dem rechten, den anderen dem linken Ohre unter solchen Kautelen zu, daß jeder zu dem entfernteren Gehörorgan nur durch die Kopfknochen gelangen kann, so hört man dennoch die Stöße. Ich habe derartige diotische Schwebungen noch mit Stimmgabel-Primärtönen aus der Mitte der Kontraoktave hervorrufen können [4]) und möchte mit Rücksicht auf gewisse pathologische Beobachtungen glauben, daß die metotische Knochenleitung sich um so mehr an der Schallübertragung durch den Kopf beteiligt, je tiefer die Primärtöne sind.

Diotische Schwebungen sind unter geeigneten Umständen selbst dann noch zu hören, wenn die Primärtöne eine so geringe Stärke haben, daß sie einzeln nicht wahrgenommen werden [5]), wie denn überhaupt nach den Beobachtungen mehrerer Forscher zwei Schallreize, deren jeder für sich unterschwellig ist, einander bei diotischem Zusammenwirken gleichsam über die Schwelle zu heben vermögen. Die Frage, ob die diotischen Schwebungen auch in diesem Falle so zu erklären sind, daß eben infolge der Kopfknochenleitung jedes der Cortischen Organe beide Töne empfängt, oder ob man mit Wundt und anderen annehmen soll, daß der von rechts und der von links kommende Ton sich erst im Zentralorgan begegnen und dort miteinander interferieren, muß meines Erachtens mit Rücksicht auf die gegen die zweite Auffassung sprechenden theoretischen und experimentellen Gründe in dem zuerst genannten Sinne

[1]) Daß hierbei die Schallübertragung von Ohr zu Ohr durch die Tuben stattfinde, darf als in der Regel ausgeschlossen betrachtet werden. — [2]) Zeitschrift f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **2**, 111, 1891. — [3]) Zeitschr. f. Ohrenheilk. **27**, 267 ff. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **52**, 151, 1901. — [5]) Silvanus P. Thompson, Philos. Magaz. (5), **4**, 274, 1877.

beantwortet werden. Ich befinde mich hierbei in Übereinstimmung mit Stumpf und Fechner, welcher letztere darauf aufmerksam gemacht hat, daß ein Schall, der auf irgend einem Wege durch die Kopfknochen von einem Ohre zum anderen dringe, nicht an sich hörbar zu sein, nicht selbst die Schwelle zu übersteigen brauche, wenn er nur ausreicht, einem wenig unterhalb der Schwelle befindlichen Schalle den zum Überschreiten derselben eben hinreichenden Zuwachs zu erteilen[1]).

Die diotischen Schwebungen unterscheiden sich von den gewöhnlichen monotischen, welche durch die Zuleitung beider Primärtöne zu einem und demselben Ohre erzeugt werden, dadurch, daß sie einen anderen, milderen Charakter haben und die Grenze, an der sie infolge zu großer Frequenz unhörbar werden, erheblich niedriger liegt. So fand Stumpf[2]), mit Stimmgabeln der großen Oktave experimentierend, daß diotisch nicht mehr als 16 bis 20 Schwebungen in der Sekunde hörbar waren; in der kleinen Oktave lag das Maximum bei 32 bis 40, in der eingestrichenen ungefähr bei 50, in der nächsthöheren etwa bei 70. In der dreigestrichenen Oktave sind die Schwebungen zweier an beide Ohren verteilter Gabeln in allen Fällen nur sehr undeutlich.

Die diotisch getrennte Zuleitung zweier Primärtöne ist ein gutes Hilfsmittel, um die Dissonanz des so gehörten Zweiklanges unabhängig von der Rauhigkeit der Schwebungen zu studieren. Mit der letzteren zugleich fallen nun aber gewöhnlich auch die Kombinationstöne weg, weshalb manche mit Dove[3]) geglaubt haben, Differenztöne kämen überhaupt nie zustande, wenn der eine Primärton vor dem rechten, der andere vor dem linken Ohre klingt. Daß diese Behauptung in so extremer Form nicht zutrifft, davon habe ich mich im Laufe einer Untersuchung: „Über die Wahrnehmung und Lokalisation von Schwebungen und Differenztönen“[4]) überzeugt. Sind beide Primärtöne gleich laut, so hört man freilich keinen Differenzton, weil dann jederseits der durch oder um den Kopf herum zum anderen Ohre übergeleitete Ton auf diesem Wege zu viel an Intensität eingebüßt hat, als daß er mit dem direkt von außen kommenden, relativ lauteren noch einen vernehmlichen Kombinationston erzeugen könnte. Überwiegt aber der eine Primärton in solchem Grade an Stärke, daß er in dem anderen Ohre mit dem dortigen Primärtone in passendem Intensitätsverhältnis zusammentrifft, so hört man hier, also auf der Seite des leiseren Primärtones, den Differenzton.

Befinden sich beide Primärtonquellen in der Medianebene, so verlegt man auch den Differenzton in diese. Treffen die Primärtöne den Beobachter von derselben Seite, so wird der Kombinationston in oder unmittelbar vor dem Ohre, auch wohl ein wenig von hinten und unten kommend, gehört, wobei sein Ort alle Bewegungen des Kopfes mitmacht, als ob er an demselben fixiert wäre. Hierin zeigen die Differenztöne ein Verhalten, das von dem der Schwebungen durchaus abweicht. Bei diesen wechselt nämlich die Richtung und Entfernung wesentlich mit derjenigen der Primärtöne, und zwar lassen sich meine mannigfachen Beobachtungen hierüber in folgende Sätze zusammenfassen: Für die Lokalisation der Schwebungen zweier Töne

[1]) Vgl. hierzu meine Abhandlung in Pflügers Archiv **61**, 544, 1895. — [2]) Tonpsychol. **2**, 470, 1890. — [3]) Pogg. Ann. **107**, 652, 1859. — [4]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **1**, 81, 1890.

ist bei ungleicher Intensität der letzteren unter allen Umständen die Richtung und Entfernung, aus der uns der stärker erregende Ton trifft, maßgebend. Ist die relative Intensität der Primärtöne gleich, so gehen die Schwebungen aus der Region zwischen den beiden Tonquellen hervor. Ein spezieller Fall hiervon ist es, daß die Stöße bei Aufstellung der Schallquellen rechts und links von der Medianebene in diese projiziert werden.

Hören wir durch Luftleitung einen in der Medianebene erzeugten Schall, so findet bei gleicher Hörschärfe beider Ohren auch mediane Lokalisation statt. Abweichungen pflegen bei aufmerksamen Versuchspersonen nicht vorzukommen. Um so schwieriger ist hierbei die genauere Beurteilung der Richtung, aus welcher der Schall kommt. Ich habe nur vereinzelte und dann in der Regel jugendliche Personen gefunden, die in dieser Beziehung keine Fehler bei einer größeren Anzahl von Versuchen machten. Im allgemeinen werden Oben, Unten, Vorn und Hinten in verschiedener Weise miteinander verwechselt, und die objektive Unrichtigkeit der irrtümlichen Angaben steht dabei gewöhnlich in einem eigentümlichen Gegensatz zu der subjektiven Sicherheit des Urteils.

Die Medianlokalisation ist die Folge der gleich starken Erregung beider Gehörorgane. Sie tritt daher — wieder beiderseits gleiche Hörschärfe vorausgesetzt — auch ein, wenn von zwei unisonen und gleich lauten Tonquellen, etwa Stimmgabeln, die eine vor das rechte, die andere vor das linke Ohr gehalten wird, falls nicht etwa, was zuweilen vorkommt, die beiden Empfindungen räumlich getrennt bleiben. Bezüglich des scheinbaren Abstandes einer median lokalisierten Schallquelle vom Kopfe lassen sich, von sonstigen Einzelheiten abgesehen, zwei Gruppen von Fällen, nämlich intracranielle und extracranielle Lokalisation, unterscheiden. Der Ton einer vor der Nase in der Luft klingenden Gabel wird nie ins Innere des Schädels verlegt. Steckt man aber die beiden Enden eines Kautschukschlauches in die Ohren und setzt auf die Mitte desselben eine sehr stark tönende Gabel, so hört man sie median im Kopfe, und zwar meist im Hinterhaupt. Dasselbe Resultat erhält man, wenn man zwei durchaus conform schwingende Telephone fest an die Ohrmuscheln preßt [1]). In einer Reihe speziell diesen Unterschied zwischen intra- und extracranieller Lokalisation betreffender Beobachtungen konnte ich [2]) feststellen, daß der scheinbar einfache und mediane Ursprungsort des Doppelschalles dem Kopfe um so näher liegt, je näher die Schallquellen, einzeln vernommen, geschätzt werden, und daß er in den Kopf hineinrückt, sobald man jede der beiden Schallquellen, für sich geprüft, direkt im Ohr ihrer Seite hört.

Ein von rechts kommender Schall wird von normal Hörenden niemals nach links verlegt und umgekehrt; wohl aber finden auch hier Verwechselungen zwischen Oben, Unten, Vorn und Hinten statt, wobei, wahrscheinlich im Zusammenhang mit Form und Lage der Ohrmuschel, im allgemeinen eine Tendenz zu bestehen scheint, die Richtungen Oben und Vorn-Oben zu bevor-

[1]) Ähnliche Versuche sind zuerst von Purkyně (Ber. d. Kgl. Böhm. Gesellsch. d. Wiss. z. Prag, 1860) angestellt. Urbantschitsch (Pflügers Arch. **24**, 579 ff., 1881) fand später, daß der Schall statt ins Hinterhaupt auch öfter in die Stirn oder an zwei symmetrische Punkte seitlich von der Mittelebene verlegt wird. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **1**, 300 ff., 1890.

zugen. Die Unterscheidung von Rechts und Links ist stets richtig, weil wir hinreichend empfindlich sind, um zu unterscheiden, daß das eine Ohr stärker erregt wird als das andere; dem ersteren liegt erfahrungsmäßig die Schallquelle näher. Die Intensitätsunterschiedsempfindlichkeit an sich zeigt uns freilich nur an, daß eines der Ohren überwiegend gereizt wird. Die Erkenntnis, um welches von beiden es sich dabei handelt, knüpft sich jedenfalls an eine Art von Lokalzeichen, welches als eine für das rechte und linke Ohr verschiedene Qualität zu den übrigen Qualitäten des Schallreizes auf dessen Wege längs der nervösen Hörbahn hinzutritt [1]). Ob für die Unterscheidung der Richtungen Oben, Unten, Vorn, Hinten besondere physiologische Einrichtungen existieren, oder ob die hierauf bezüglichen Urteile sich nur auf mittelbare Kriterien stützen, ist noch unsicher, das letztere aber wahrscheinlicher. Die im verflossenen Jahrhundert mehrfach, zuletzt von Preyer [2]) und in anderer Form von Münsterberg [3]) vertretene Auffassung, die Bogengänge ständen mit der Schalllokalisation in Beziehung, haben sich wenigstens nicht als stichhaltig erwiesen [4]).

Die Beurteilung der Entfernung einer Schallquelle ist noch schwerer und unsicherer als diejenige der Richtung. Hier spielen Unterschiede der Stärke und Klangfarbe offenbar eine gewisse Rolle, wenn auch keineswegs immer eine Intensitätsverminderung als eine Vergrößerung oder eine Intensitätssteigerung als Verkleinerung des Abstandes aufgefaßt wird. Es fehlt noch sehr an genaueren Untersuchungen.

VI. Von den Geräuschen.

a) Physikalisches und Physiologisches.

Eine präzise psychophysiologische Definition des Begriffes Geräusch zu geben, ist nicht ganz leicht. Im gewöhnlichen Sprachgebrauch pflegt man als Geräusch im allgemeinen einen solchen Schalleindruck zu bezeichnen, dem weder das Einheitliche, Klare, Glatte, Andauernde eines einfachen Tones, noch das Melodische, Harmonische, Rhythmische einer musikalischen Klangmasse eigen ist. Indessen bestehen doch zwischen Geräuschen und Tönen verwandtschaftliche Beziehungen in der Empfindung. Den Geräuschen kommen ebenso wie den Tönen Unterschiede hinsichtlich der Dauer, der Stärke, der Gleichmäßigkeit und vor allen Dingen der Höhe zu. Die Sprache bringt letzteres onomatopoetisch dadurch zum Ausdruck, daß in der Benennung eines Geräusches als charakteristischer Vokal ein um so dunklerer gewählt wird, je tiefer das Geräusch, ein um so hellerer, je höher es ist. Eine von der Tiefe zur Höhe fortschreitende Reihe von Geräuschen wird z. B. gekennzeichnet durch die Wörter: Brummen, Murmeln, Schnurren, Knurren, Poltern, Rollen, Sausen, Rauschen, Hauchen, Rasseln, Knarren, Klappern, Knattern, Schmettern, Wehen, Kreischen, Knistern, Klirren, Ticken, Knipsen, Zischen, Zwitschern.

Daß man den Geräuschen eine mehr oder weniger bestimmte Tonhöhe zuschreibt, hängt mindestens zum Teil damit zusammen, daß die meisten,

[1]) Vgl. Stumpf, Tonpsychol. 2, 52 ff., 1890. — [2]) Pflügers Arch. 40, 586, 1887. — [3]) Beiträge z. experim. Psychol. 2 (1889). — [4]) Vgl. v. Kries, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 1, 235, 1890.

wenn nicht alle, einen oder mehrere Töne enthalten. Handelt es sich um ein nicht zu leises und zu kurzes Geräusch, so wird man oft genug ohne Mühe solche Töne heraushören. In anderen Fällen ist die Analyse nicht selten sehr schwierig. Stumpf, welcher in seiner Tonpsychologie [1]) den Geräuschen ein besonderes Kapitel gewidmet hat, berichtet, er habe einmal im Plätschern eines Gebirgsbachs besonders scharf und beständig *fis*^{1} gehört, immer umspielt von benachbarten Tönen; dazu ein Glucksen und Gurgeln, aus momentanen tieferen Tönen bestehend, und außerdem noch das eigentliche, gar nicht analysierbare Rauschen. Subjektive Geräusche scheinen ihm weniger deutlich Töne zu enthalten als objektive. Wenigstens konnte er in einem anhaltenden Geräusche dieser Art während einer Entzündung des Mittelohres bloß zuweilen mit einiger Bestimmtheit einen Ton (*gis*^{2}) entdecken und im übrigen höchstens verschiedene Töne, alle jenseits c^2, zu hören glauben; der Schalleindruck war eigentlich fast rein geräuschartig. Nach meinen Erfahrungen kann man sich durch Übung bis zu einem gewissen Grade im Heraushören von Tönen aus Geräuschen vervollkommnen. Ein äußerliches Hilfsmittel besteht darin, mehrere Geräusche ähnlicher Art rasch aufeinander folgen zu lassen. So kann man, wenn man eine Anzahl entsprechend abgestimmter hölzerner Klangstäbe der Reihe nach auf einen Tisch wirft, deutlich die Tonleiter hören, während die Töne der einzelnen Hölzer nur mühsam wahrzunehmen sind [2]).

Um also das Wesen irgend eines Geräusches und der zugehörigen Empfindung zu ergründen, wird man zunächst die darin enthaltenen einfachen Töne analytisch abzuscheiden, ihre Höhe, Stärke und Dauer zu bestimmen und schließlich den rein geräuschigen Rest weiter zu prüfen haben — falls nämlich dann ein solcher übrig bleiben sollte. Indessen sind wir mit unseren gegenwärtigen Kenntnissen und Methoden noch nicht entfernt in der Lage, alle Geräusche in solcher Vollständigkeit zu zerlegen. Findet die physikalische und physiologische Analyse schon den Klängen gegenüber Schwierigkeiten und Grenzen, so gilt dies in noch höherem Grade von den Geräuschen.

Um Aufklärung über die physikalische Beschaffenheit wenigstens einiger derselben zu erhalten, hat man versucht, die zugrunde liegende Luftbewegung sichtbar zu machen. So stellte Töpler [3]) mit seinem Schlierenapparat Untersuchungen über den elektrischen Funken an, denen zufolge dieser nur eine einzige Luftwelle erzeugen soll, ein Ergebnis, das von verschiedenen späteren Autoren ernstlich in Zweifel gezogen ist. Hensen [4]) beobachtete durch Knall verursachte Lufterschütterungen mittels einer Koenigschen manometrischen Flamme, wobei eine nicht sehr stark gedämpfte, schwach gespannte Kautschukmembran verwendet wurde. Dieselbe reagierte immer mit mehreren, oft bis zu 10, Schwingungen, und eine ähnliche Bewegung knüpfte sich an die Laute *p*, *b*, *k*, *t*. Brücke [5]) wandte gegen die Versuche mit Kautschukmembranen ein, daß die letzteren störende

[1]) 2, 497 ff., 1890. — [2]) Vgl. auch R. Koenig, Wiedemanns Ann. **14**, 375, 1881. — [3]) Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode, Bonn 1864. Über neuere Versuche in dieser Richtung vgl. Fortschritte d. Physik, Jahrgang 1899 u. f. — [4]) Hermanns Handbuch d. Physiol. 3 (2), 19, 1880. — [5]) Sitzungsber. d. Wiener Akad. 90 (3), Oktober 1884.

Nachschwingungen machten, und benutzte statt ihrer eine gedämpfte Glimmerplatte. Auf diese Weise erhielt er beim Händeklatschen und beim Explodieren von Seifenblasen, die mit einem Luft-Wasserstoff-Gemenge gefüllt waren, in der Regel nur eine Zacke. Beim Herausschießen von Pfropfen aus Bleiröhren ergaben sich dagegen stets mehrere Zacken; hierbei hatte das Geräusch auch einen mit der Länge der Röhre an Tiefe zunehmenden Beiklang, welcher sich aus stehenden Luftschwingungen in der wie ein angeblasener Resonator wirkenden Röhre erklärte. Gegen die Brückeschen Versuche kann man wieder geltend machen, daß die Glimmerplatte möglicherweise schwächere Wellenbewegungen wegen ihrer Beschaffenheit nicht oder nicht kräftig genug zur Darstellung bringt. Im ganzen ist also die optische Methode der Geräuschanalyse als ziemlich unvollkommen zu bezeichnen. Insbesondere ist es zurzeit noch fraglich, ob es wirklich irgend einen Knall gibt, dem nur eine einzige Luftwelle zugrunde liegt. Wenn Hensen und Schmidekam [1]) darauf hinweisen, daß schon die möglichst einfache Bewegung des Trommelfelles, welche entsteht, wenn man dasselbe mit einer Sonde berührt oder wenn man die Sonde zurückzieht, eine Knallempfindung liefert, so ist dem gegenüber daran zu erinnern, daß auch bei diesem Versuch Nachschwingungen der Luft im Gehörgang zum mindesten nicht ausgeschlossen sind.

Auch das Verfahren, die in einem Geräusche enthaltenen Töne durch Resonanz nachzuweisen, ist mehrfach angewendet. Hensen [2]) benutzte das Fortepiano zur Analyse des Händeklatschens. Bald hier, bald dort „regte sich eine Anzahl Saiten", und das Instrument „gab eine weit bestimmtere Antwort über den Wechsel der Knallhöhe als es das Ohr direkt vermochte".

Ähnliche Beobachtungen kann man übrigens mit beliebigen nicht zu leisen Geräuschen in der Nähe des Klavieres anstellen. Mach [3]) untersuchte speziell die Geräusche explodierender Knallgasblasen auf diese Weise und fand, daß große vorzugsweise die tiefen, kleine die hohen Saiten zum Mitschwingen bringen. Einer systematischen Analyse aller möglichen Geräusche steht freilich die Schwierigkeit entgegen, daß dazu sehr viele Saiten oder Resonatoren nötig sind und daß beide Hilfsmittel versagen, wenn die Stärke der betreffenden Teiltöne ein bestimmtes Minimum nicht überschreitet. Überdies ist hier wohl der Ort, eine gewisse Vorsicht bei der Verwendung von Resonanzmitteln gegenüber solchen Geräuschen zu empfehlen, welche mit verhältnismäßig starken Erschütterungen oder Luftströmungen verbunden sind. Gut gearbeitete Stimmgabeln auf Resonanzkasten sind derart empfindlich, daß sie schon durch leises Anstoßen oder schwaches Anblasen zum Tönen gebracht werden und so gelegentlich die Existenz eines faktisch in dem zu prüfenden Geräusch gar nicht enthaltenen Tones vortäuschen können. Von Saiten dürfte Analoges gelten. Kommt doch die Äolsharfe offenbar nicht dadurch zum Klingen, daß sie auf Töne im Winde resoniert, sondern weil der Luftstrom die Saiten ähnlich wie der Violinbogen aus ihrer Gleichgewichtslage bringt. Was schließlich die Resonatoren anlangt, so ist bekannt, daß schon ein leises Hinwegblasen über die Schallöffnung dieselben zum Tönen veranlaßt.

---

[1]) Arbeiten d. Kieler Physiol. Inst. 1868, S. 49. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. 23, 80, 1886. — [3]) Analyse der Empfindungen usw. (2), Jena 1900, S. 173.

Ein Beobachter, welcher ein scharfes und geübtes Ohr besitzt, verfügt damit über ein ganz vortreffliches Mittel zur Geräuschanalyse, aber für alle Fälle reicht es doch auch nicht aus. Diejenigen Teiltöne eines Geräusches, welche, absolut genommen, unter der Schwelle bleiben, kommen freilich überhaupt nicht für das Geräusch als physiologische Erscheinung in Betracht. Dafür wird es indes bei Geräuschen sehr viel öfter als bei musikalischen Klängen vorkommen, daß einzelne darin enthaltene Töne neben der gesamten Schallmasse relativ unterschwellig sind, oder eine sehr kurze Dauer haben, oder hinsichtlich der Tonhöhe sehr nahe zusammen liegen. Alle diese Momente bilden aber, wie früher schon ausführlicher erörtert worden ist, beträchtliche und unter Umständen unüberwindliche Hindernisse der physiologischen Schallzerlegung.

Immerhin verdanken wir dem physiologischen Experiment das Wichtigste von dem, was wir bis jetzt über die Beziehungen zwischen Tonempfindungen und Geräuschempfindungen wissen.

Zunächst steht fest, daß ein allmählicher Übergang zwischen Ton und Geräusch möglich ist, insofern ein Ton bei exzessiver Verkürzung seiner Dauer zuletzt, für den einen Hörer eher als für den anderen, einen geräuschartigen Charakter annimmt, wovon bereits in dem Abschnitt über die kürzesten Töne die Rede war. So hat Mach [1]) es ja direkt ausgesprochen, daß das c^0 „zu einem kurzen, trockenen Schlag oder schwachen Knall von sehr undeutlicher Tonhöhe zusammenschrumpfe", wenn die Zahl der Schwingungen auf zwei bis drei reduziert würde. Dennert [2]) gibt an, daß das Anschlagen eines auf c^4 abgestimmten Pappresonators mit einem Hämmerchen den Ton sehr ähnlich dem Uhrticken erscheinen läßt und daß der Klang, den ein zwischen die Zähne geklemmtes, dünnes, schmales Holzstäbchen hervorruft, wenn es angestoßen wird, mit zunehmender Verkürzung des Stäbchens sich erst successive erhöht, dann in ein tickendes und zuletzt in ein knipsendes Geräusch übergeht. Versuche mit dem gleichen Resultat der Verwandlung eines Tones in ein Geräusch hat Kessel [3]) mit Pfeifen ausgeführt. Man kann dazu aber auch Glocken oder Weingläser benutzen, indem man sie anfänglich frei aufgehängt und darauf bei wachsender durch Auflegen der Finger bewirkter Dämpfung anschlägt.

Wie schon Helmholtz in seiner Lehre von den Tonempfindungen angegeben hat, kann man anderseits ein Geräusch aus Tönen kombinieren, wenn man hierzu nahe benachbarte wählt, z. B. sämtliche Tasten des Klaviers in der Breite von einer oder zwei Oktaven zugleich anschlägt. Der geräuschartige Charakter wird in diesem Falle wohl durch das Zusammenwirken der Dissonanz, der Unanalysierbarkeit und des wirren Durcheinanderwogens der Schwebungen bedingt. Stumpf [4]) erklärt, daß der Versuch nur in der tiefen Region wirklich zu einem beinahe reinen Geräusche führe; in den mittleren Oktaven bleibe der Eindruck im wesentlichen ein Klang, aus dem auch eine größere oder geringere Anzahl Teiltöne herauszuhören sei. Danach scheint es fast, als ob ein Geräusch um so eher als Klang beurteilt würde, je mehr dem Beobachter durch Übung oder andere Umstände die

---

[1]) Lotos, Aug. 1873. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **29**, 82, 1890 und **41**, 111, 1896. — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 138, 1882. — [4]) Tonpsychologie **2**, 504 ff., 1890.

Zerlegung in Teiltöne erleichtert ist, und als ob ein und dasselbe Geräusch für verschiedene Hörer einen verschieden hohen Grad von Geräuschigkeit im Gegensatz zum Klange besitzen könne.

Ein Geräusch kann auch entstehen, wenn eine Anzahl Töne von verschiedener Höhe sehr schnell aufeinander folgen. Allerdings darf die Succession nicht durchweg in derselben Richtung verlaufen. „Wir können", sagt Stumpf hiervon mit Recht, „den schnellsten Wechsel von Tönen herstellen, wenn wir mit dem Finger über die Tasten streichen (gute Dämpfung des Klaviers vorausgesetzt) oder auf einer Violinsaite stetig hinaufrutschen oder den eine gedackte Pfeife verschließenden Pfropfen hin und her schieben ... aber wir hören kein Geräusch, sondern eben eine rasche Tonveränderung." Indessen verhält sich die Sache anders, wenn höhere und tiefere Töne in buntem Durcheinander abwechseln. Versuche dieser Art kann man freilich am Klavier nicht gut anstellen, wohl aber mit Hilfe einer Seebeckschen Sirenenscheibe. Konstruiert man nämlich den Löcherkreis einer solchen derart, daß die Entfernungen sämtlicher Öffnungen voneinander verschieden, und zwar regellos bald größer, bald kleiner sind, so geben je zwei aufeinander folgende Löcher beim Anblasen während der Rotation einen äußerst kurzen Ton, und alle diese Töne sind ungleich hoch. Als Gesamteindruck resultiert ein Schall, der mit der Umdrehungsgeschwindigkeit an Höhe zu- oder abnimmt, im übrigen aber vollständig den Charakter eines Geräusches hat. Oder man verfährt so, daß man den Löcherkreis aus diversen Gruppen von mehr als zwei Öffnungen zusammensetzt und den Löchern innerhalb der einzelnen Gruppe den gleichen, aber für jede Gruppe einen anderen Abstand erteilt. Auch diese Anordnung ergibt für das Ohr ein Geräusch, das physikalisch aus kurzen, rasch einander folgenden Tönen von wechselnder Höhe besteht. Beide Formen des Experimentes sind bereits von Dennert[1]) ausgeführt und ich kann die Richtigkeit der Beobachtung nur bestätigen.

Aus dem Mitgeteilten geht hervor, daß Geräuschempfindungen möglich sind, die sich aus Tonempfindungen zusammensetzen, allerdings in einer Weise, welche bei musikalischen Klängen im allgemeinen nicht recht vorzukommen pflegt, insofern es sich eben um Töne von großer Kürze, irregulärem, schnellem Wechsel der Tonhöhe, sehr geringem Unterschiede der Schwingungszahlen bei großer Menge handelt. Wenn wir daher bei der Untersuchung irgend eines Geräusches nach der analytischen Abscheidung aller deutlich darin enthaltenen Töne einen rein geräuschhaften, nicht weiter analysierbaren Rest übrig behalten, so kann derselbe sehr wohl noch eine Kombination aus Tönen von der eben erwähnten Art sein.

Es liegt also, wenigstens bei dem gegenwärtigen Stande unseres Wissens, kein zwingender Grund vor, die Existenz von Geräuschen, welche mit Tönen nichts zu tun haben und ein akustisches Phänomen von eigener Art sind, anzunehmen. Wohl aber läßt sich vom Standpunkte der Helmholtzschen Resonanztheorie aus ein Argument dagegen anführen, nämlich dieses, daß für die Perzeption der Geräusche, falls dieselben eine spezifische Klasse von Sinnesempfindungen wären, auch ein besonderes Organ vorhanden sein müßte, was aber nicht der Fall ist. Das Cortische Organ in der Schnecke wird ja

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. 24, 184, 1887.

von der Resonanzhypothese gänzlich für die Töne in Anspruch genommen, und die Endorgane des *Nervus acusticus* in den Otolithenorganen und den Ampullen der Bogengänge dienen nach der Anschauung der meisten Physiologen der Gegenwart zur Wahrnehmung von Lage- und Bewegungsempfindungen.

Helmholtz selbst hat in den früheren Ausgaben seiner Lehre von den Tonempfindungen die Vermutung ausgesprochen, daß die zur Resonanz anscheinend wenig zweckmäßigen Hörhärchen in den Ampullen der Bogengänge und den Säckchen vorzugsweise bei der Perzeption der Geräusche beteiligt sein möchten. Später trat er der Auffassung bei, daß die Ampullenhärchen uns die Empfindung der drehenden Bewegungen des Kopfes vermitteln, ist aber dabei geblieben, daß die Hörhärchen der Otolithensäckchen zur Aufnahme der quiekenden, zischenden, schrillenden, knipsenden Hörempfindungen geeignet seien und die Art ihrer Reaktion nur gradweise von der der Schneckenfasern verschieden wäre. Exner[1]) verlegt die Empfindung der Geräusche ausschließlich in die Schnecke. Die Nerven des Cortischen Organes erfahren nach ihm nicht nur dann eine Erregung, wenn die Schwingungen der zugehörigen Fasern in der Basilarmembran eine gewisse Elongation erreicht haben, sondern auch dann, wenn die Bewegung der Schneckenfasern selbst bei geringem Ausschlag sehr schnell erfolgt ist. „Während die Empfindung des Tones entsteht, indem wenige Fasern in relativ langsames Mitschwingen geraten, entsteht die Empfindung des objektiven Geräusches, indem sämtliche Fasern der *Membrana basilaris* mit relativ großer Geschwindigkeit aus ihrer Lage geschnellt werden.“ Brücke hat sich in der oben erwähnten Abhandlung der Auffassung Exners im wesentlichen angeschlossen. Bezüglich der Momentangeräusche, der Explosionen und Schläge kam er zu dem Resultat, daß sie die tonhörenden Nerven zu erregen vermöchten, und die kontinuierlichen Geräusche des Zischens, Wehens, Rauschens hält er für nicht prinzipiell verschieden von den erstgenannten. Denn im Rauschen des Meeres wie des Windes kämen viele kleine, unter günstigen Umständen einzeln hörbare Explosivgeräusche und Schläge vor; daneben enthalte das Rauschen offenbar noch Reibungsgeräusche, die sich zu den Tonwellen verhielten wie die unregelmäßigen Kräuselungen einer Wasseroberfläche zu gleichmäßig fortschreitenden Wogen. Das Zischen unterscheide sich vom Rauschen hauptsächlich durch die Höhe der Einzelgeräusche und die Schnelligkeit ihrer Aufeinanderfolge. Das Hauchen und Wehen repräsentiere die schwächsten durch Reibung verursachten unregelmäßigen Luftbewegungen, welche noch durch das Gehör wahrgenommen würden. Auch Mach[2]) steht auf dem Standpunkte, daß das Geräusch eine Kombination von Tönen ist, „deren Zahl, Höhe und Intensität mit der Zeit variiert“, und weist zur Begründung dieser Ansicht namentlich auf den stetigen Übergang hin, der zwischen Tönen und Geräuschen möglich ist.

Dahingegen tritt Stumpf in der Tonpsychologie für die Existenz reiner Geräusche als einer eigenen Klasse von Empfindungen und für ein speziell Geräusche perzipierendes Sinnesorgan im Ohre ein. Er hebt an mehreren Stellen des Werkes besonders hervor, daß ihm die Schwebungen zu dem

---

[1]) Pflügers Arch. **13**, 228, 1876. — [2]) Analyse der Empfindungen (2), 172 ff., 1900.

Gesamteindruck des Klanges noch Geräusche hinzuzubringen schienen. Entscheidende Beobachtungen über diesen interessanten Punkt liegen allerdings bis jetzt weder von seiten Stumpfs noch von seiten eines anderen Forschers vor, und ich für meine Person möchte vorläufig glauben, daß der geräuschige Charakter der Schwebungen durch die Unanalysierbarkeit des Komplexes der vielen wenig verschiedenen Tonempfindungen und durch die an manche bekannte Geräusche erinnernde rauhe oder rollende Unstetigkeit des Ganzen hinreichend erklärt sei. Brächte der schwebende Zusammenklang zweier Töne als Nebeneffekt noch ein Geräusch durch Erregung eines gesonderten Geräuschempfindungsapparates zustande, so dürfte man wohl erwarten, gelegentlich einem Ohrenkranken zu begegnen, der entweder nur den Klang oder nur das Geräusch bzw. wenigstens eines von beiden überwiegend deutlich hört. Dennert[1]) hat hierauf in seiner ohrenärztlichen Praxis besonders geachtet, aber niemals etwas derartiges beobachtet.

Überhaupt gehört Dennert zu denjenigen Autoren, welche keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Klängen und Geräuschen anerkennen und keine getrennten Perzeptionsorgane für beide Schallarten annehmen. Er[2]) erklärt die häufig zugunsten eines spezifischen Geräuschapparates ins Feld geführte Beobachtung, daß Personen mit sehr herabgesetztem Hörvermögen bisweilen noch einzelne Geräusche, wie Ticken, Knipsen, Klopfen, leidlich hören, mit dem verschiedenen Grade des Ergriffenseins der Teile des Gehörorgans, welche die Wahrnehmung hoher und tiefer Töne vermitteln. Je nachdem hohe Töne relativ besser gehört werden als tiefe oder umgekehrt, können auch hohe oder tiefe Geräusche noch verhältnismäßig gut perzipiert werden, während das Hörvermögen im ganzen herabgesetzt ist. In vielen Fällen werden auch einzelne Laute des Alphabets oder einzelne Geräusche von solchen schwerhörigen Individuen noch relativ leicht vernommen, welche im allgemeinen ein schlechtes Sprachgehör besitzen. Die bevorzugten Laute sind dann nach Dennert solche, deren charakteristische Teiltöne hinreichend lange auf das Ohr einwirken, während mit der Verkürzung der Tondauer die Perzeptionsfähigkeit um so rascher abnimmt, je weiter die Schwerhörigkeit vorgeschritten ist.

Schwendt und Wagner haben bei ihren „Untersuchungen von Taubstummen“ [3]) auch Hörprüfungen mit Geräuschen vorgenommen. In Berücksichtigung des Umstandes, daß die echten Taubstummen sehr intensive Geräusche, wie Donnern, Schießen und auch wohl zuweilen Händeklatschen, im Trommelfell fühlen oder als Erschütterungen des Bodens wahrnehmen, verwendeten sie als Schallquelle die Taschenuhr, den Hörmesser von Politzer, das Blasen des Galtonpfeifenballons, das Streichen des Violinbogens auf Stimmgabeln, das Klopfen gegen die Koenigschen Klangstäbe, das Cri-cri, gesprochene Konsonanten, Nägelknipsen und Fingerschnalzen. Das Gesamtresultat der ihrer Natur nach freilich ziemlich unvollkommenen Versuche war, daß diejenigen Patienten, welche keine Töne hörten, für Geräusche ebenfalls taub waren, weshalb denn auch diese beiden Beobachter die Geräuschperzeption in die Schnecke verlegt wissen möchten.

---

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **29**, 72, 1890. — [2]) Ebenda **41**, 109 ff., 1896. — [3]) Basel 1899, S. 82 ff.

Steinbrügge[1]) hat über einen eigentümlichen Fall von Hysterie bei einem 45jährigen Landmanne berichtet, welcher regelmäßig Krampfanfälle bekam, wenn er Instrumentalmusik oder auch nur das Blasen auf einer Kindertrompete hörte, während er gegen Geräusche, Knallerschütterungen, Trommeln, Straßen- und Eisenbahnlärm ganz unempfindlich war. Der Autor bezeichnet selbst diesen Fall ausdrücklich als ein seltenes und für die Frage nach den Beziehungen zwischen Tönen und Geräuschen wichtiges Naturexperiment. Um so mehr ist die Mangelhaftigkeit der psychophysischen Untersuchung des später geheilten Kranken zu bedauern. Dieselbe beschränkte sich auf die Prüfung mit einer Stimmgabel, deren Ton einen Anfall auslöste, und mit dem Geräusch eines Induktionsapparates, das keine Reaktion hervorrief. Nicht einmal der so einfach anzustellende Versuch über die Wirkung des beim gleichzeitigen Niederdrücken vieler benachbarter Tasten des Klaviers entstehenden Geräusches ist gemacht worden. Unter diesen Umständen läßt sich der Fall in keiner Weise physiologisch für die Lehre von den Geräuschen verwerten. Aus seiner Beschreibung muß man schließen, daß die in jedem Geräusche, auch in dem der Feder eines Induktoriums, bald mehr bald weniger zahlreich enthaltenen deutlichen Töne keinen Krampf zuwege brachten. Alsdann aber ist es nicht weiter verwunderlich, daß auch die weniger deutlichen Teiltöne es nicht taten, und das Krankheitsbild bleibt mit jener Anschauung, wonach die eigentlichen Geräusche aus lauter unanalysierbaren Tönen bestehen, ebensogut vereinbar wie mit der gegenteiligen.

b) Psychophysisches.

Wie schon bei der Besprechung der Hörprüfungsmethoden erwähnt ist, hat man zur Bestimmung der Hörschwelle ebenso wie zu den Beobachtungen über die Unterschiedsempfindlichkeit für Schallstärken immer mit Vorliebe Geräusche benutzt, weil mit ihnen in verschiedenen Beziehungen bequemer zu operieren ist, wenn sie auch sonst wegen ihrer komplizierten Zusammensetzung und qualitativen Unkontrollierbarkeit keine idealen Untersuchungsmittel sind. Der Versuchsmodus ist im Prinzip sehr einfach. Man läßt entweder eine Kugel aus genau bestimmbarer Höhe auf eine horizontale Platte oder ein Pendel längs einer zur Bestimmung des Fallwinkels dienenden Gradteilung gegen einen festen Klotz fallen. Der erste, welcher ein Schallpendel konstruierte, dürfte Wolke[2]) gewesen sein. Sein Apparat bestand aus einem Schallbrett von Tannenholz, auf das ein eichener Schlägel (an einem Gradbogen entlang) fiel. Itard[3]) benutzte später als Akumeter einen frei hängenden Kupferring, gegen den ein Stäbchen mit einer Kugel am Ende schlug.

Schafhäutl[4]) ließ exakt gewogene Kugeln aus Kork, Elfenbein oder Blei auf den Mittelpunkt einer Glasplatte fallen, welcher vom Ohre 91 mm entfernt war. Er fand dabei, daß der Schall einer aus 1 mm Höhe fallenden Korkkugel von 1 mg Gewicht für ihn bei voller Ruhe der Umgebung

[1]) Zeitschr. f. Ohrenheilk. 19, 328, 1889. — [2]) Nachricht von den zu Jever durch die Galvani-Voltasche Gehörgebekunst beglückten Taubstummen. Oldenburg 1802. — [3]) Traité des maladies de l'oreille et l'audition, Paris 1821 u. 1842. — [4]) Abhandl. d. math.-physikal. Kl. d. Münchener Akad. d. Wiss. 7, 501, 1855.

25mal von 30 Versuchen mit aller Sicherheit noch hörbar war. Ein ähnliches Resultat erhielt er mit anderen jüngeren Beobachtern; für ältere war das Geräusch meist schon unterschwellig. Nörr[1]) bediente sich zu seinen Versuchen über das Unterscheidungsvermögen für Schallstärken bleierner Kugeln von sehr verschiedenem Kaliber und einer unmittelbar auf einem Tisch liegenden Eisenplatte. Die Schwellenintensität lieferte für sein Ohr ein Gewicht von 6,7 mg bei einer Fallhöhe von 1,2 bis 2,2 mm und einer Distanz des Ohres gleich 50 cm. Andere Autoren haben als Fallkörper Wassertropfen verwendet; so Lewy[2]), der 1 dg schwere Tropfen auf eine Blechplatte mit Filzunterlage fallen ließ. Nach dem mir allein zugänglichen, leider allzu kurzen Bericht des Archivs für Ohrenheilkunde fand Lewy als Resultat von 6000 Beobachtungen, daß das Ohr bis zum 15. Lebensjahr den Schall eben noch bei einer Fallhöhe von 50 bis 60 mm vernimmt, während der Erwachsene dazu eines Fallraumes von 60 bis 80 mm und der Greis eines solchen von 100 bis 120 mm bedarf, immer den nämlichen Abstand des Ohres von der Schallquelle gleich 25 cm vorausgesetzt.

Diese Angaben lassen sich nicht direkt miteinander vergleichen. Denn einerseits ist die Distanz zwischen Ohr und Platte von den einzelnen Autoren verschieden gewählt und das Gesetz von der Abnahme des Schalles mit der Entfernung gerade für Bedingungen wie die hier vorliegenden noch nicht sicher genug erkannt; anderseits besitzen wir noch kein eindeutiges und einwandfreies Maß für die Intensität eines durch den Fall einer Kugel auf eine Platte erzeugten Schalles. Die lebendige Kraft, mit der die Kugel auftrifft, ist proportional dem Produkt $m.h$ bzw. mv^2, wenn h die Fallhöhe ist und v die Geschwindigkeit, mit welcher die Kugel auf der Platte anlangt. Wird nun die lebendige Kraft vollständig an die Platte und durch deren Schwingungen wieder an die Luft abgegeben, so wird man die Schallintensität proportional mh oder mv^2 setzen können. Es ist aber keineswegs an sich selbstverständlich, daß es sich so verhält. Ein Teil der Kraft kann außer in Schallschwingungen noch in andere Bewegungsformen übergehen, worunter die bleibende Deformation der Kugel und der Platte eine wichtige Rolle spielt, und nur wenn diese Energieverluste sehr geringe sind, wird in Wirklichkeit Proportionalität mit $m.h$ zu erwarten sein. Dieselbe ist in der Tat innerhalb der anzuwendenden Grenzen von Starke[3]), einem Schüler Wundts, annähernd bestätigt. Zu einem anderen Resultat ist dagegen, wie schon früher erwähnt, K. v. Vierordt[4]) gelangt. Er fand in seinen Beobachtungen, daß zwei Schalle gleich stark gehört wurden, wenn die Produkte aus Gewicht und Geschwindigkeit (oder Quadratwurzel der Fallhöhe) gleich waren, und stellte daher als Schallmaß die Größe $p.h^{\varepsilon}$ auf, worin ε nach seinen und Oberbecks[5]) genaueren Versuchen annähernd gleich 0,6 zu setzen ist. Ein zweiter Schüler Wundts, E. Tischer[6]), kam zu dem Ergebnis, daß ε auch mit Fallhöhe und Gewicht stark variiere und daß ein allgemeines Maß für Schallstärken gar nicht zu formulieren sei; man

[1]) Zeitschr. f. Biol. **15**, 297 ff., 1879. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **37**, 269, 1894. — [3]) Philos. Stud. **3**, 264 ff., 1886. — [4]) Die Schall- und Tonstärke und das Schallleitungsvermögen der Körper, Tübingen 1885. Vgl. W. Preyer, Wissensch. Briefe v. G. Th. Fechner u. W. Preyer, Hamburg u. Leipzig 1890, S. 169 ff. — [5]) Wiedemanns Ann. **13**, 222, 1881. — [6]) Philos. Stud. **1**, 543, 1883. (Auch Leipziger Dissert. 1882.)

müsse es für jede einzelne Versuchsreihe besonders ermitteln. Ebenso ist Fechner[1]) der Ansicht, daß ε wesentlich von dem Material der Kugeln und der Platte abhängig sei. Mit Rücksicht auf diese Unsicherheit in der Messung der objektiven Schallstärke wird man die Angabe Schafhäutls, der Schwellenwert der Intensität betrage für sein Ohr 140,07 Milligramm-millimeter, und Nörrs Berechnung seiner Schwelle zu rund 1500 Milligramm-millimeter vorsichtig aufzunehmen haben.

Die einer exakten Messung der Schallstärke, mit welcher ein bestimmtes Geräusch unter bestimmten Umständen das Ohr erregt, entgegenstehenden Schwierigkeiten haben sich auch von jeher bei den Untersuchungen über die Unterschiedsempfindlichkeit für Geräuschintensitäten geltend gemacht und deren Ergebnisse zum Teil in Frage gestellt. So ist die von Renz und Wolf[2]), welche nach der Methode der richtigen und falschen Fälle arbeiteten, und von Volkmann[3]), der die Methode der Minimaländerungen wählte, übereinstimmend gemachte Angabe, zwei Schalle seien dann eben mit Sicherheit als verschieden laut zu erkennen, wenn ihre Intensitäten sich gerade wie 4 : 3 verhielten, unvereinbar mit Vierordts Behauptung, daß $\varepsilon = 0{,}6$ sei und die Schallstärke mit der ersten Potenz statt mit dem Quadrat der Entfernung abnehme. Die von den genannten Autoren gefundene Gültigkeit des Weberschen Gesetzes ist dagegen in der unter Vierordts Leitung verfaßten, oben schon angeführten, Abhandlung von Nörr bestätigt worden. Seitdem sind mehrere weitere Publikationen von Schülern Wundts erschienen[4]). Es ergaben darunter diejenigen Methoden, die auf der Vergleichung kleinster Unterschiede beruhen, in sehr weiten Grenzen ebenfalls eine Übereinstimmung mit dem Weberschen Gesetze, während bei den mittleren Abstufungen je nach dem Versuchsverfahren die Resultate zwischen der geometrischen und arithmetischen Teilung der zwischen den beiden Grenzreizen gelegenen Strecke schwankten.

---

[1]) Revision d. Hauptpunkte d. Psychophysik, Leipzig 1882, S. 375. — [2]) Arch. f. physiol. Heilkunde 1856, S. 185. — [3]) Vgl. Fechner, Elemente der Psychophysik 1, 176, 1859/60. — [4]) S. d. Nähere (namentlich in bezug auf die vervollkommnete Technik des Fallphonometers) bei Wundt, Grundzüge d. Physiol. Psychologie (5) 1, 509 ff., 1902.

Der Geruchssinn

von

W. Nagel.

Zusammenfassende Darstellungen, in denen die ältere Literatur gesammelt ist:

Bidder, Artikel „Riechen" in Wagners Handwörterbuch der Physiologie. Bd. II, 1844.

Cloquet, Osphrésiologie. 2. Aufl. Paris 1821. Deutsch: Weimar 1824.

v. Vintschgau, Geruchssinn, in Hermanns Handbuch der Physiologie. Bd. III. Leipzig 1879.

Zwaardemaker, Physiologie des Geruches. Leipzig 1895.

Diese Arbeiten sind im folgenden Abschnitte stets nur mit dem Namen des Autors zitiert.

I. Das Geruchsorgan. Die Riechnerven.

Die dem Geruchssinn dienenden Nervenendigungen liegen in dem als Regio olfactoria bezeichneten Teil der Nasenschleimhaut, der sich beim Menschen und vielen Tieren schon makroskopisch durch eine braungelbe Färbung von der übrigen Nasenschleimhaut, der Regio respiratoria (Schneidersche Membran), unterscheidet.

In beiden Regionen verbreiten sich die peripheren Endigungen des Nervus trigeminus, auf deren Gegenwart und Tätigkeit die allgemeine Sensibilität der Nasenschleimhaut, ihre Empfindlichkeit für Berührung, für Temperaturreize, wie auch für die Reizwirkung gewisser gasförmiger Substanzen (Ammoniak, Essigsäure u. a.) beruht. Die Fasern gehören größtenteils dem zweiten Aste des Trigeminus an und endigen, wie die sensiblen Fasern in Schleimhäuten überhaupt, in feinen Aufsplitterungen, ohne besondere Endkörperchen und ohne Übergang in Zellen. Die Trigeminusfasern des obersten Teiles entstammen dem Ramus ophthalmicus des ersten Trigeminusastes. Über die Frage, ob die Trigeminusfasern am Riechakt beteiligt sind, s. unten, S. 592.

Die eigentlichen Riechnerven sind unzweifelhaft jene kleinen Nervenstämmchen, welche, von den obersten Partien der Nasenschleimhaut ausgehend, in wechselnder Zahl die Lamina cribrosa des Siebbeines durchsetzen (Nervi olfactorii), oberhalb deren sie sich in die kolbenförmige Anschwellung des Tractus olfactorius, den Bulbus olfactorius, einsenken. Die Gesamtheit dieser Nervenstämmchen wird für gewöhnlich begrifflich in eins zusammengefaßt und als Nervus olfactorius kurzweg bezeichnet.

Das vom Olfactorius innervierte Gebiet der Nasenschleimhaut ist beim Menschen verhältnismäßig kleiner als bei den meisten Wirbeltieren, kleiner auch als man es früher (in den älteren Lehrbüchern) angenommen und gezeichnet hatte, irregeführt wohl durch die Braunfärbung, die einen größeren Bezirk der Nasenschleimhaut einnimmt.

Fig. 106.

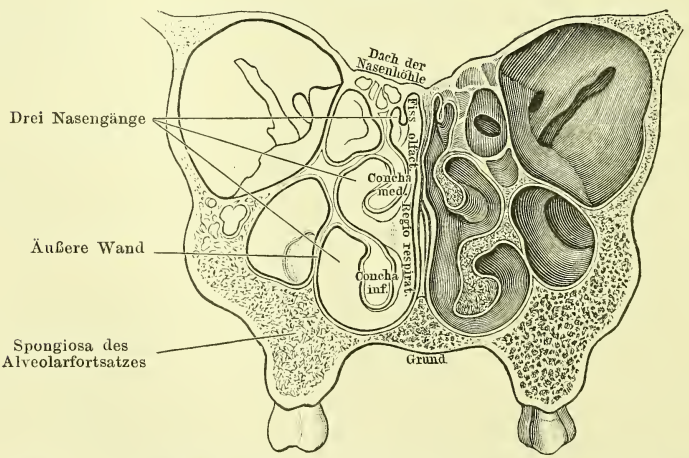
Die Verbreitung des Riechepithels in der Nase nach v. Brunn (aus Zwaardemaker, Physiologie des Geruchs). Am halbierten Kopf ist die Nasenscheidewand nach oben geklappt gedacht; das Riechepithel auf der Nasenscheidewand und der lateralen Wand der Nase ist durch schwarze Farbe markiert.

Der größte Teil der oberen Muschel und der ihr gegenüberliegende Teil des Septums trägt das eigentliche Riechepithel. Mittlere und untere Muschel gehören nicht mit zur Riechregion.

Zwischen oberer und mittlerer Muschel und Nasenscheidewand klafft nur eine enge Spalte, die Riechspalte (Fig. 107), die durch ihre Lage hinten oben in der Nasenhöhle deren unzugänglichsten und gegen Berührung sowie gegen starken Luftzug geschütztesten Teil darstellt.

In der respiratorischen sowohl wie in der olfactorischen Region münden zahlreiche Drüsen, die speziell in der letzteren eine Übergangsform zwischen acinösen und tubulösen Drüsen darstellen. Ob ihr Sekret irgend eine spezifische Bedeutung für das

Fig. 107.



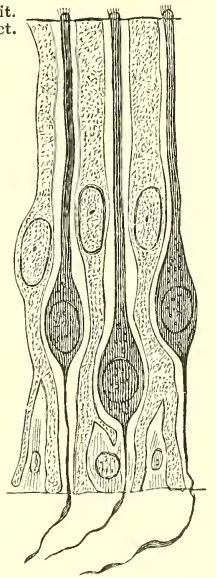
Frontalschnitt durch die Nasenhöhle nach E. Zuckerkandl (aus Heitzmann, Anatomischer Atlas).

Riechen hat, oder nur zur Feuchterhaltung der Membran dient, ist unbekannt. Man weiß zwar, daß bei abnormer Trockenheit der Nasenschleimhaut und bei profusem Nasenkatarrh das Riechvermögen abgeschwächt bis aufgehoben ist; man weiß auch anderseits, daß starke Sekretion der Schleimhaut auf Grund nervöser Reizzustände bestehen kann, ohne daß der Geruchssinn merklich alteriert wäre; indessen liegt in allen diesen Fällen kein sicherer Beweis dafür vor, daß gerade die Regio olfactoria von der Sekretionsanomalie mit betroffen wäre. Beim Nasenkatarrh muß auch die Behinderung der Luftströmung in der Nase durch Schwellung der unteren und mittleren Muschel als gewichtige Ursache für die Geruchsstörung mit in Betracht gezogen werden.

Das Epithel der Riechschleimhaut besteht aus cylindrischen Epithelzellen, „Stützzellen", zwischen denen die Ursprungszellen der Olfactoriusfasern, die eigentlichen „Riechzellen", eingebettet liegen (Fig. 108).

Schon Max Schultze beschrieb die Riechzellen als an ihrem basalen Ende direkt in die Fasern des Olfactorius übergehend. Gleiches Verhalten hatte man auch für die Sinneszellen und Nervenfasern in den anderen Sinnesorganen teils vorausgesetzt, teils direkt zu sehen geglaubt. Die neueren Untersuchungen mittels der Golgischen Nervenfärbung haben diese Auffassung bezüglich der übrigen Sinnesepithelien als unzutreffend, für das Riechepithel aber als richtig erscheinen lassen.

Fig. 108.



Riech- und Stützzellen aus der Riechschleimhaut des Menschen, schematisch (nach Henle-Merkel).

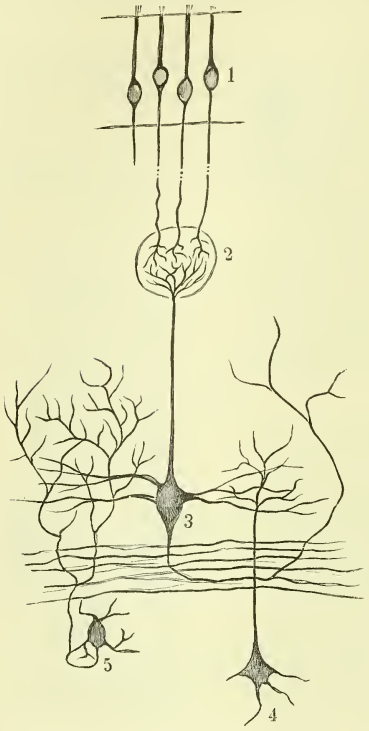
Während also in den anderen Sinnesepithelien die Sinneszelle gewissermaßen einen Neuron für sich darstellt, an den sich die Endaufsplitterung des zweiten Neurons anlegt, sind im Riechorgan Sinneszelle und Nervenfaser organische Bestandteile eines und desselben Neurons. Eine solche Sonderstellung eines einzelnen Organs ist in hohem Grade überraschend und es wird eine gewisse Zurückhaltung in den Aussagen über diesen Punkt zunächst noch angezeigt sein. Es bedarf stärkerer Gründe, als die Demonstration mit der im Prinzip für die Ermittelung feinster Details irrationellen und tatsächlich nicht selten irreführenden Chromsilberfärbung, um jenen Unterschied als unumstößlich sicher bestehend hinzustellen. Gerade im gegenwärtigen Zeitpunkte, wo die Anschauungen über die gegenseitigen Beziehungen unter den Elementen des Nervensystems in fortwährender Wandlung begriffen sind, und die Möglichkeit intercellulärer Verbindungen durch feinste Fibrillen auf Grund neuer Färbmethoden wieder mehr in den Vordergrund gerückt ist, ist es nicht möglich, sich für die eine oder die andere Eventualität, Kontinuität oder Kontiguität, zwischen Nervenzellen und Nervenfasern allgemein zu entscheiden. Bei dem jetzigen Stande des physiologischen Wissens über das Wesen der Nervenerregung und ihre Weiterleitung von Neuron zu Neuron ist überdies die Entscheidung jener Frage ohne besonderes Interesse für die spezielle Physiologie der Sinnesorgane, sie bietet zunächst ein rein morphologisches Interesse.

Eigentümlich ist der weitere Verlauf der Riechnervenbahn. Die Nervenfasern, die nach der Durchdringung der Siebbeinplatte in den Bulbus olfactorius eingetreten sind, treten hier unter dendritischer Aufsplitterung mit einem neuen Neuron in Beziehung. Die Berührungsstelle der beiden Endbäumchen ist anders als an anderen Stellen des Zentralnervensystems gestaltet, sie bildet einen kugeligen Körper, den Glomerulus. Der hier

beginnende neue Neuron heißt Mitralzelle. (Weiteres s. Abschn. über Gehirn, Bd. IV dieses Handbuchs.

Ob der Trigeminus am eigentlichen Riechakt beteiligt ist, dürfte zurzeit auf Grund der vorliegenden Beobachtungen schwer zu entscheiden sein. Einige ältere Sektionsbefunde französischer Autoren sprechen dafür. Cl. Bernard[1]) hat bei der Sektion einer im Leben mit angeblich normalem Riechvermögen begabten Person die Olfactorii ganz atrophisch gefunden. Magendie[2]) konstatierte bei einem Hunde, dessen beide Tractus olfactorii durchschnitten waren, Zeichen von Riechvermögen. Weitere Notizen über ähnliche, übrigens stark umstrittene Befunde aus älterer Zeit vgl. u. a. bei v. Vintschgau. Neue Beobachtungen dieser Art an Menschen und Tieren, namentlich die Erhebung von Sektionsbefunden über den Zustand der Riechlappen, sind wünschenswert.

Fig. 109.



Schema des centralen Riechnervenverlaufes. 1. Riechzellen der Nasenschleimhaut. 2. Glomerulus im Bulbus olfactorius. 3. Mitralzelle. 4. Zelle der Körnerschichte. 5. Zelle mit vielfach verzweigtem Achsencylinderfortsatz (aus Henle-Merkels Grundriß der Anatomie des Menschen.

Von neueren Erfahrungen sind die interessanten Beobachtungen F. Krauses[3]) wichtig, der nach einseitiger Totalexstirpation des Ganglion Gasseri den Geruchssinn auf der operierten Seite geschwächt, aber nicht aufgehoben fand (ebenso den Geschmack s. u.). Da nicht wohl einzusehen ist, wie Ausfall der Trigeminusfunktion den Geruchssinn indirekt schwächen sollte, muß doch als möglich zugegeben werden, daß ein Teil der Riechfasern auf Trigeminuswegen zum Gehirn geleitet wird. Nachdem wir durch mannigfaltige Erfahrungen gezwungen worden sind, anzuerkennen, daß die Geschmacksfasern auf ihrem Wege zum Hirn ganz seltsam komplizierte Bahnen durchlaufen und unter anderen auch Trigeminusbahnen benutzen, kann eine analoge Annahme für die Riechfasern nicht ohne weiteres abgewiesen werden.

Man könnte ja an anomale Sekretionsverhältnisse in der Nasenschleimhaut als Folge der Trigeminusexstirpation denken, die das Riechen störten, doch erscheint diese Deutung, die dem Olfactorius die Alleinherrschaft im Gebiete des Geruchs sicherte, schon deshalb nicht recht plausibel, weil doch die Geschmacksstörung nach Trigeminusverlust entschieden nicht auf diesem Wege zu erklären ist.

Daß die Trigeminusendigungen durch gas- und dampfförmige Stoffe überhaupt gereizt werden, zeigen mit Bestimmtheit die nicht seltenen Fälle,

[1]) Leçons sur le système nerveux 2, 232, 1858. — [2]) Ebenda S. 224. — [3]) Münchener med. Wochenschr. 1895, Nr. 55 ff. und: Die Neuralgie des Trigeminus, Leipzig (Vogel) 1896.

in denen dauernd oder vorübergehend eine absolute Anosmie (Unfähigkeit zu riechen) vorhanden ist. Solche Personen empfinden das Eindringen von Ammoniak oder Chlorgas, von Dämpfen der Essigsäure oder des Formaldehyds in ihre Nase ganz deutlich, ohne indessen feinere Unterschiede machen zu können.

Die Qualität verschiedener Zigarrensorten freilich unterscheiden solche Patienten zuweilen, trotz völligen Verlustes des Geruchssinnes, doch noch an der Beschaffenheit des Rauches, der ihre Nasenschleimhaut reizt.

Die bei der Anosmie erhalten bleibenden Empfindungen, die der Trigeminus vermittelt, sind brennend und stechend, bei Einwirkung gewisser Stoffe (Menthol, Chloroform) auch Temperaturempfindungen. Für den Normalsinnigen gehören diese Empfindungen mit zum Gesamteindruck, den das Riechen an jenen Substanzen wachruft, man ist aber nicht imstande, zu sagen, was an dem Gesamteindruck eine reine Geruchsempfindung ist, und was jenen accessorischen Empfindungen der Trigeminussphäre zugehört. Daher kommt es denn, daß total anosmatische Personen beim „Riechen" an gewissen Stoffen doch noch eine leicht brennende oder stechende Empfindung haben, während der Vollsinnige geneigt ist, jene Stoffe als „reine" Riechstoffe zu bezeichnen. In anderen Fällen, z. B. bei den oben genannten Stoffen (Formaldehyd u. a.), ist freilich der begleitende Effekt der Trigeminusreizung so stark, daß er sich deutlich von dem Geruchseindruck als etwas verschiedenes abhebt.

Die oben auf Grund der Krauseschen Erfahrungen gemachte Annahme einer Mitbeteiligung des Trigeminus am Riechen widerstreitet nicht der Tatsache, daß bei völliger Anosmie diejenigen sensiblen Funktionen der Nasenschleimhaut intakt geblieben sind, die die eigentliche Domäne des Trigeminus darstellen, die stechenden, brennenden Empfindungen, die z. B. auch in der Conjunctiva ausgelöst werden können. Daß die Trigeminus-Endorgane, die dieser Funktion dienen, mit den etwa dem Riechen dienenden identisch seien, muß ja ohnehin als höchst unwahrscheinlich gelten. Man kann sehr wohl annehmen, die Ursachen, welche eine Aufhebung des Geruchssinnes bewirken, zerstörten in der Nasenschleimhaut gerade nur diejenigen Endorgane, vermittelst deren wir riechen, gleichgültig, ob die in ihnen entspringenden centripetalen Fasern nun weiterhin auf Trigeminus- oder Olfactoriusbahnen verlaufen.

II. Von den Eigenschaften der Riechstoffe.

Welche chemischen oder physikalischen Eigenschaften eine Substanz haben muß, damit sie Geruch erzeugend wirken kann, darüber vermögen wir zurzeit nur sehr wenig auszusagen. Zwaardemaker hat dem Gegenstande ein besonderes Kapitel, „Geruch und Chemismus", in seiner Monographie über den Geruchssinn gewidmet. Diese Zusammenstellung eigener und fremder Beobachtungen und Vermutungen demonstriert deutlich genug unsere klägliche Unkenntnis auf diesem Gebiet. Wohl finden manche Autoren allerlei „geruchgebende Atomgruppen" bei den Riechstoffen heraus, aber (wie auch Zwaardemaker mit Recht hervorhebt) die Fälle, in denen Substanzen total verschiedener chemischer Konstitution gleichen Geruch haben (ich erinnere an Nitrobenzol—Benzaldehyd), oder wo chemisch aufs nächste verwandte Stoffe ganz verschieden riechen, stellen allen Klärungsversuchen bisher unüberwindliche Schwierigkeiten in den Weg. Zwaardemaker ist wohl etwas optimistischer als ich, denn er findet doch in einer Reihe von Fällen bestimmte Gerüche durch bestimmte Atomgruppen vertreten. Ich finde die Ausnahmen

zu zahlreich, die Erscheinungen zu regellos, als daß ich auch nur vermutungsweise angeben möchte, wovon die Riechbarkeit der Stoffe abhängen könnte.

Einige interessante Tatsachen, die aber immer noch wenig Aufklärung geben, verdanken wir den Untersuchungen von Haycraft[1]) und Passy[2]). Zwaardemakers Beobachtungen ergänzen sie in manchen Punkten. In dem periodischen System der chemischen Elemente, das Lothar Meyer und Mendelejeff aufgestellt haben, finden wir diejenigen Elemente, die in riechenden Verbindungen vorkommen, fast ausschließlich in der fünften, sechsten und siebenten Gruppe; freilich kommt dann die große Gruppe der Kohlenwasserstoffe noch außerdem hinzu.

Die fünfte Gruppe enthält folgende Elemente: Stickstoff, Phosphor, Vanadium, Arsen, Niobium, Antimon, Didymium, Tantalium und Wismut.

Die sechste Gruppe besteht aus Sauerstoff, Schwefel, Chrom, Selen, Molybdän, Tellur, Wolfram und Uran.

Die siebente Gruppe enthält: Fluor, Chlor, Mangan, Brom und Jod.

Daß unter diesen Elementen zahlreiche von denen enthalten sind, die bei Verbindungen mit Geruch stets wiederkehren, ist unverkennbar, ebenso, daß innerhalb der einzelnen Reihe eine gewisse Periodizität besteht, einzelne Glieder selten oder gar nicht, andere, in regelmäßigen Distanzen auftretende, besonders häufig in riechenden Stoffen zu finden sind. In der achten Gruppe kommt Osmium vor, dessen riechende Oxydationsstufe, Überosmiumsäure, ja bekannt ist.

Eine zweite unbestrittene Tatsache ist die, daß in homologen Reihen, wie etwa in denen der Fettsäuren oder Alkohole, der Geruch im allgemeinen eine allmähliche, stetige Änderung zeigt, freilich immer in kleineren Strecken der Reihen. Plötzliche Unstetigkeiten fehlen nicht ganz. Gerade bei den genannten homologen Reihen ist bemerkenswert, daß die niedersten Glieder einen sehr schwachen Geruch haben, der bei den höheren Gliedern unter stetiger Qualitätsänderung zunächst an Intensität zunimmt (Ameisensäure, Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Valeriansäure, Capronsäure usw. und die zugehörigen Alkohole). Bei den höheren Gliedern bricht die Reihe der Gerüche dann ziemlich plötzlich ab, sie werden geruchlos (Stearinsäure usw.).

Eine andere Reihe sich stetig ändernder Gerüche finden wir in Benzol, Toluol, Xylol usw.

Recht wenig begründet scheint mir die Behauptung Aronsohns[3]), daß alle chemischen Elemente geruchlos seien, ein Satz, dem auch Zwaardemaker zustimmt. Daß Chlor, Brom, Jod nicht geruchlos sind, ist allbekannt, und die Behauptung, ihre Riechbarkeit beruhe auf dem Eingehen chemischer Verbindungen (mit Wasserstoff) in der Luft der Nasenhöhle, ist erstens unbewiesen und zweitens deshalb belanglos, weil wir ja von keinem einzigen Stoffe wissen, welchem Umstande er seine Riechbarkeit verdankt. Ohne chemische Umsetzungen wird es bei dem Erregungsvorgang überhaupt nicht abgehen, und wieviel davon schon vor dem eigentlichen Erregungsprozeß sich abspielt, wissen wir zurzeit noch nicht. Es liegt hier ein ganz ähnlicher Fall vor, wie bezüglich der Sichtbarkeit oder Unsichtbarkeit ultravioletten Lichtes. Daraus, daß wir dieses nur durch Vermittelung der Fluorescenz im Auge wahrnehmen, darf noch nicht geschlossen werden (wie es zuweilen irrtümlich geschieht), das ultraviolette Licht als solches vermöge die Retina nicht zu erregen.

[1]) Brain 1888, S. 166. — [2]) Compt. rend. 1892, Mai. — [3]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abt., 1886.

Von den physikalischen Eigenschaften der Riechstoffe ist die wichtigste und allgemeinste die Flüchtigkeit, die allerdings ganz außerordentlich große Differenzen aufweist. Übrigens können auch in feinste Tröpfchen oder feste Partikelchen zerstäubte Substanzen den Geruchssinn erregen. Es kommt eben nur darauf an, daß die Substanz, die einen chemischen Reiz auf die Riechzellen ausüben kann, irgendwie zu ihnen hingelangt.

Sehr bemerkenswert ist die Beobachtung Erdmanns[1]), daß einige Riechstoffe, wie Rosenöl, Jonon und Citral in flüssiger Luft leicht löslich sind. Es wäre interessant, wenn sich ähnliche Erfahrungen bei Riechstoffen in größerer Anzahl machen ließen.

Recht wenig vermögen wir mit der alten, viel diskutierten Beobachtung anzufangen, daß manche riechende Substanzen, z. B. Campher, in Pulverform auf reines Wasser gebracht, dort rasche tanzende und wirbelnde Bewegungen ausführen (Romieu 1756, von Prévost und Liégeois[2]) eingehend untersucht).

Dieses „odoroskopische Phänomen", wie es Prévost nannte, gibt für die Eigenschaften der Riechstoffe schon deshalb keine Aufklärung, weil es auch an nicht riechenden Körpern zu beobachten ist und nicht bei allen riechenden Stoffen auftritt.

Erwähnt sei endlich, daß nach Tyndalls[3]) Untersuchungen die Dämpfe riechender Stoffe ein besonders hohes Absorptionsvermögen für strahlende Wärme aufweisen. Es ist aber nicht erwiesen, daß die Eigenschaft der Riechbarkeit hiermit in irgend welchem Zusammenhange steht.

Über Fortbewegung der Riechstoffteilchen durch Diffusion hat Zwaardemaker Messungen angestellt. Bemerkenswerterweise macht sich der Einfluß der Weite eines Rohres, in dem die Diffusion erfolgt, für verschiedene Stoffe in ganz ungleichem Maße geltend. Ich gebe nachstehende Tabelle nach Zwaardemaker wieder, welche die Zeiten enthält, in denen sich die verschiedenen Gerüche durch Röhren von 40 cm Länge hindurch verbreiteten (s. Tabelle).

Die Unterschiede zwischen der Fortbewegung in engen und in weiten Röhren sind nach Zwaardemaker am größten bei den Stoffen, welche leicht an den Glaswänden haften und daran zum Teil hängen bleiben.

Gerüche	Dauer der Fortbewegung um 40 cm	
	in weiten Röhren Sekunden	in engen Röhren Sekunden
Schwefeläther	9	9
Hammeltalg	10	31
Paraffin	18	18
Wachs	20	65
Terpentin	22	80
Nelkenöl	30	75
Kautschuk	45	45

[1]) Zeitschr. f. angew. Chemie 1900 und Journ. f. prakt. Chemie 61. — [2]) Der Acad. des scienc. 1799 vorgelegt. — [3]) Die Wärme betrachtet als eine Art der Bewegung (Übersetzung), Braunschweig 1875.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gerüche, in der Nähe der Riechquelle pro Sekunde berechnet, ergibt beispielsweise folgende Werte:

	cm pro Sek.
Essigäther	10,0
Schwefeläther	4,4
Campher	2,1
Terpentin	1,8
Nelkenöl	1,3
Kautschuk	0,9

Im allgemeinen also Werte zwischen 1 und 10 cm pro Sekunde.

Die Weiterverbreitung von Gerüchen durch Luftströmungen von bestimmter Richtung wird sich bei denjenigen Riechstoffen am deutlichsten bemerken lassen, bei denen die Diffusionsgeschwindigkeit eine geringe ist, die Duftwolke also nicht so schnell verfliegt, wie es beispielsweise beim Äther der Fall sein muß.

Manche Substanzen riechen wesentlich stärker, wenn sie mit Wasser befeuchtet sind (getrocknete Kräuter, manche Mineralstoffe). Es handelt sich aber hier um komplizierte Stoffgemische oder Körper mit organischer Struktur, und das Wasser wirkt wohl nur dadurch, daß es rein mechanisch die Verflüchtigung der riechenden Bestandteile erleichtert. Eine eigentliche Bedingung für die Riechbarkeit letzterer ist es also nicht.

III. Der Weg des Luftstromes beim Riechen.

Die Riechstoffe können in die Nasenhöhle und die Riechspalte auf zwei Wegen hineingelangen, durch die Nasenlöcher und durch die Choanen. Bisher hat der Mechanismus des Riechens bei der Einatmung, wobei der Luftstrom durch die Nasenlöcher einstreicht, auffallenderweise viel mehr Beachtung gefunden, als der zweite Modus des Riechens, der beim Menschen meines Erachtens die biologisch entschieden wichtigere Rolle spielt. Wir betrachten die beiden Arten der Zuleitung der Riechreize getrennt.

Leicht ist festzustellen, daß vor die Nasenlöcher gehaltene selbst sehr flüchtige Riechstoffe so lange keine Geruchsempfindung erzeugen, als die Atmung angehalten wird. Es genügt aber, einen kräftigen Riechstoff nur während einer Atempause vor die Nase zu halten, um dann beim nachherigen Einatmen die inzwischen ins Nasenloch emporgestiegenen Dämpfe zu riechen.

A. Fick[1]) hat gezeigt, daß der für das Riechen wichtigste Teil des Atmungsstromes durch die vordere Hälfte des Nasenloches geht. Atmet man riechende Dämpfe durch ein Röhrchen ein, das durch den vorderen Teil des Nasenloches in die Nase gesteckt ist und die Gerüche nach oben gegen das Dach der Rachenhöhle leitet, so werden die Gerüche wahrgenommen, nicht aber, wenn das Röhrchen im hinteren Teile des Nasenloches liegt und die Dämpfe gegen die mittlere und untere Muschel leitet. Auch schädigt Verschluß der vorderen Hälfte der Nasenlöcher den Geruch wesentlich mehr, als

[1]) Lehrbuch der Anat. und Physiol. d. Sinnesorgane. Lahr 1864, S. 100.

Verstopfung der hinteren Hälfte. Bidder weist darauf hin, daß beim willkürlichen Riechen (Schnüffeln) sich die vordere Hälfte der Nasenlöcher stärker erweitert als die hintere. Ein von dem vorderen Ende der mittleren Muschel bogenförmig nach vorne unten ziehender Wulst in der Nasenwand (Meyers Agger nasi) mag in gewissem Maße darauf hinwirken, daß sich der Einatmungsstrom in einen starken Zweig, der flach ansteigend zwischen unterer und mittlerer Muschel passiert, den Atmungsstrom, und einen schwächeren Zweig teilt, der über dem Wulst steil ansteigend das Nasendach erreicht. Der letztere Strom ist sicher der bei weitem schwächere, aber auch sicher nicht der einzige und wichtigste Weg, auf welchem Riechstoffe zur oberen Muschel und der Riechschleimhaut hinaufgelangen, wie die gleich zu erwähnenden Experimentaluntersuchungen über den Weg des Luftstromes gezeigt haben.

Daß die Richtung des Luftstromes für das Riechen nicht gleichgültig ist, zeigt unter anderem auch die öfters gemachte Erfahrung, daß Verlust der äußeren Nase den Geruchssinn schädigt. Es fehlt dann die Ablenkung nach oben durch den Agger nasi.

Unzutreffend in ihrer allgemeinen Fassung ist die Angabe Bidders, daß durch eine Spritze in die Nase geblasene Dämpfe keine Geruchsempfindung auslösten. Der Irrtum mag auf ungünstiger Richtung des Luftstromes in Bidders Versuchsanordnung beruhen.

Um den Weg des Luftstromes in der Nase bei der Einatmung zu bestimmen, hat Paulsen[1]) interessante Versuche an menschlichen Leichenköpfen angestellt. Er belegte an einem median durchsägten Kopf die Wandungen der Nasenhöhle mit Stückchen feuchten Lackmuspapiers, legte dann die beiden Kopfhälften wieder aneinander und sog mit Hilfe eines Blasebalgs ammoniakgeschwängerte Luft durch die Nasenlöcher ein. Die mehr oder weniger starke Bläuung des Lackmus ließ dann erkennen, welche Partien der Nasenhöhlenwand und des Septums von der eingesogenen Luft am reichlichsten bestrichen wurden. Der Weg der Luft war im wesentlichen bogenförmig (Fig. 110 a. f. S.) und lief mehr am Septum als an den Muscheln entlang, in der Höhe des mittleren Nasenganges (zwischen unterer und mittlerer Muschel). Bemerkenswert war namentlich, daß die Regio olfactoria von dem eigentlichen Atmungsstrom unberührt blieb, der unter ihr vorbeiging. Es können also nur kleinere Abzweigungen des Hauptstromes und Luftwirbel sein, die die Riechstoffe zur Regio olfactoria hinaufbefördern. Wir werden darin eine zweckmäßige Einrichtung zu erblicken haben, durch welche die Ablagerung von eingeatmetem Staub auf der Riechschleimhaut sowie die Einwirkung starken Temperaturwechsels in der Riechspalte vermieden wird.

Paulsens Versuchsergebnisse werden im wesentlichen bestätigt und ergänzt durch Versuche, die Zwaardemaker an einem Pferdekopf, Franke[2]) an einem menschlichen Kopfe anstellte. Die beiden Autoren markierten den Weg des Luftstromes durch Rauch, den sie der Luft beimischten. Es zeigte sich wiederum der bogenförmige Verlauf des Luftstromes durch den mittleren Nasengang. Während untere und mittlere Muschel stark beräuchert wurden, blieb die Riechschleimhaut frei. Bei Nachahmung schnüffelnder Atmung sah Franke am Schlusse jeder In- und Exspiration starke Luftwirbel in der Nasenhöhle einsetzen. Ähnliche Versuche, wie diejenigen Paulsens

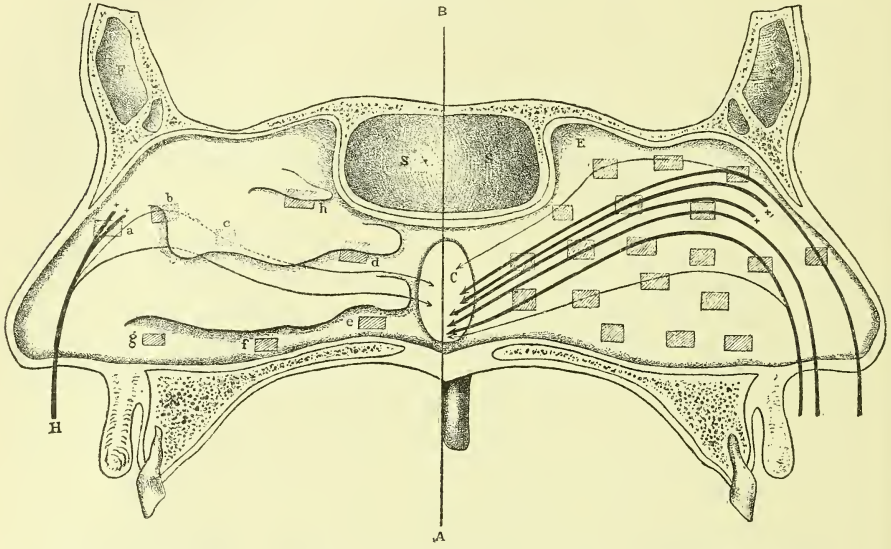
[1]) Sitzungsber. d. K. Akad. d. Wissenschaft., III. Abteil., **85**, 348, 1882. — [2]) Arch. f. Laryng. u. Rhinol. **1**, 236, 1893.

und Frankes, sind kürzlich von Danziger[1]) und Rethi[2]) beschrieben worden.

Auch die Beobachtungen von Kayser[3]) an Lebenden, bei denen feines Magnesiapulver aspiriert und rhinoskopisch der Ort des hauptsächlichsten Niederschlages festgestellt wurde, stimmen gut zu den bisher erwähnten.

Bei manchen Tieren ist in leicht erkennbarer Weise die Riechschleimhaut so placiert, daß der eigentliche Atmungsluftstrom sie vermeidet und die Riechstoffe nur durch Luftwirbel und durch Diffusion zu ihr gelangen können.

Fig. 110.



Weg des Einatmungsstromes nach Paulsen (aus Zwaardemaker, Physiologie des Geruchs). In der rechten Hälfte der Figur ist der Atmungsstrom entlang der Nasenscheidewand, in der linken Hälfte entlang der äußeren (rechten) Nasenwand durch die Pfeile markiert. Zur Orientierung über die Lage des Riechepithels vergl. Fig. 106; im übrigen siehe die Beschreibung der Versuchsanwendung im Text.

Zwaardemaker hat mit Recht hervorgehoben, daß diese Momente auch durchaus zureichend sind, um den Mechanismus des Riechens beim Menschen zu erklären.

Bidder hatte angegeben, nur bei Inspiration könne deutlich gerochen werden, exspiratorisch nicht: von einem in den Mund genommenen Stück Campher hat man nur einen höchst unbedeutenden Geruchseindruck beim Ausatmen. Nachdem von verschiedenen Seiten darauf hingewiesen worden war, daß Flüssigkeiten und Gase, die aus dem Magen emporsteigen, im exspiratorischen Riechen wahrnehmbar seien, zeigte Aronsohn (Citat oben S. 594) durch Versuche, daß Bidders dem Wortlaut nach richtige Angabe doch nur mit Vorbehalt aufzunehmen ist. Atmet man durch den Mund mit Riechstoffen geschwängerte Luft ein und durch die Nase wieder aus, so ist deutlich der Geruch der Substanz zu erkennen. Daß der Geruch schwächer ist als bei Einatmung durch die Nase, erklärt sich meines Erachtens zur Genüge

[1]) Monatsschr. f. Ohrenheilk. 1896, S. 331. — [2]) Sitzungsber. K. Akad. Wien, 109, 17, 1900. — [3]) Zeitschr. f. Ohrenkeilk. 20, 96, 1889.

dadurch, daß die Riechstoffe in Mund, Schlund, Trachea und Bronchien großenteils von den feuchten Wänden absorbiert werden und somit in viel kleinerer Menge zur Reizwirkung in der Nase gelangen.

Genießen wir irgend welche Speisen, so gelangen vielleicht schon während des Kauens ab und zu die flüchtigen Dämpfe, die von ihnen etwa ausgehen, um das gesenkte Gaumensegel herum in die Nase. Am ausgiebigsten aber geschieht das während des eigentlichen Schluckaktes, wobei auch von Getränken die flüchtigen Reizstoffe in die Nase von hinten her einströmen und jene Empfindungen erzeugen, die der Unkundige für Geschmacksempfindungen erklärt. Ein sehr bekannter einfacher Versuch (den Chevreul[1]) zuerst beschrieben zu haben scheint) gestattet den Nachweis, daß es sich um Geruchsempfindungen handelt, die in der Nase zustande kommen: bei zugehaltener Nase kaue man abwechselnd kleine Apfel- und Zwiebelstückchen; man wird die Unterscheidung der beiden Substanzen nicht eher machen können, als bis man die Nase öffnet. Bei diesem Versuche ersetzt das Zuhalten der Nasenlöcher in leicht ersichtlicher Weise den nicht leicht durchführbaren Verschluß der Choanen. Solange die Nase vorn verschlossen ist, ist das Eindringen von riechenden Dämpfen selbst im Anschluß an den Schluckakt fast völlig verhindert.

Ich habe oben erwähnt, daß ich den Zutritt der Riechstoffe durch die Choanen, das Riechen vom Nasenrachenraum aus für biologisch wichtiger halte, als das Riechen durch die Nasenlöcher; allerdings gilt das in erster Linie für den Menschen. Tiere beriechen sehr vielfach die Gegenstände aus nächster Nähe, indem sie die Nase bis fast zur Berührung annähern. Man denke an den Hund, der eine Fährte verfolgt, oder an das Schwein, das schnüffelnd seine Nahrung sucht. Dieses Beriechen und Beschnüffeln der Gegenstände tritt jedoch beim Menschen (und nicht nur beim Kulturmenschen) sehr zurück. Führen wir die Speisen zum Munde, so gelangt vom Löffel wohl leicht etwas Duft in die Nase und kann wahrgenommen werden. Mehr wird das der Fall sein, wenn wir das Weinglas an die Lippen setzen; hier prüfen wir auch wohl absichtlich und bewußt den Duft. Aber das sind, vom Standpunkte der biologischen Bedeutung der Sinne aus betrachtet, Nebensächlichkeiten.

Daß der Geruchssinn der „Wächter unseres Atmungsapparates“ sei, wie der Geschmackssinn derjenige des Verdauungsapparates, wie es wohl in manchen populären Schriften und im „anthropologischen“ Unterricht für die liebe Jugend gelehrt wird, das werden wir doch auch nur sehr mit Vorbehalt anerkennen. Vor den irrespirablen Gasen schützt uns nicht der Olfactorius, sondern der Trigeminus. Nein, die Hauptbedeutung des Geruchssinnes für den Menschen liegt darin, daß dieser Sinn mit dem Geschmack wie zu einem einheitlichen Ganzen verbunden, die von den Speisen ausgehenden chemischen Reize percipiert und verwertet, teils zur Kontrolle des Genossenen, teils, wie weiter unten noch näher zu erörtern sein wird, zur Anregung und Förderung des Appetits, des Triebes zur Nahrungsaufnahme. Verliert ein Mensch seinen Geruchssinn, so ist er nicht darum in erster Linie zu bedauern, weil ihm nun die Rosen nicht mehr duften, noch auch darum, weil er nun nicht mehr einen mit übelriechenden, vielleicht giftigen Gasen erfüllten Raum vermeiden wird,

[1]) Journ. d. physiol. experim. 4, Paris 1824.

sondern deshalb, weil ihm jetzt ein Hauptreiz zum Essen und damit zu der Ernährung seines Organismus fehlt.

Die Nebenhöhlen der Nase im Stirnbein, Keilbein und Oberkiefer sind für die Geruchsperception ohne Bedeutung. An solchen Höhlen, die bei Operationen eröffnet waren, ist ihre Unempfindlichkeit für Gerüche direkt erprobt worden. Selbst eine sekundäre Bedeutung durch Beeinflussung der Richtung des Atmungsstromes erscheint ausgeschlossen. Einige phantastische Versuche, den Nebenhöhlen doch eine Funktion in diesem Sinne zuzuteilen (Hilton, Bérard[1]), haben keine Überzeugungskraft. Braune und Clasen[2]) vermuten, daß die durch den Druckausgleich am Schlusse jeder In- und Exspiration zwischen Nasenhöhle und Nebenhöhlen eintretende Luftströmung die riechenden Stoffe zur Riechspalte führe. Um die Wirkung dieses Druckausgleiches und der davon abhängigen Strömung irgendwie erheblich zu machen, dazu sind die Nebenhöhlen erstens viel zu klein, zweitens ist die Kommunikationsstelle zwischen der Nasenhöhle und namentlich der Oberkieferhöhle so ungünstig für diesen Zweck gelegen, daß die Ansicht von Braune und Clasen entschieden abzulehnen ist.

IV. Die Reizung des Riechorganes.

a) Die Reizung des Riechorganes mit adäquaten Reizen.

Der adäquate Reiz des Geruchsorganes ist der chemische; die Substanzen, die für die Riechnerven einen Reiz bilden, müssen mit diesen Nervenendigungen in direkten Kontakt kommen. Die außerordentliche Kleinheit der Substanzmengen, die zur Erzielung einer Reizung notwendig sind, haben manche Autoren auf die Vermutung geführt, daß es sich bei der Reizung des Riechorganes um eine Art Fernwirkung, vermittelt durch Bewegungsvorgänge im Äther, handle, daß also die substanzielle Verbreitung der Riechstoffmolekeln bis an und in die Riechschleimhaut gar nicht nötig sei. Für derartige Anschauungen fehlt aber jede tatsächliche Grundlage und in der Kleinheit der riechbaren Substanzmengen liegt jedenfalls kein Grund, die bisherige Auffassung zu verlassen. Zwaardemaker weist mit Recht darauf hin, daß die Verbreitung der Riechstoffe durch den Wind sehr für die substanzielle Natur des Reizes spricht.

Da die Oberfläche der Riechschleimhaut durch die Drüsen stets feucht gehalten wird, muß die Wirkung der auf die Riechschleimhaut auftreffenden Riechstoffpartikelchen sich durch das dünne Flüssigkeitshäutchen an der Oberfläche der Schleimhaut hindurch geltend machen können. Die einfachste Annahme über die Art, wie eine derartige Durchdringung jener Flüssigkeitsschicht erfolgen kann, ist zweifellos die, daß sich die Riechstoffteilchen in der Flüssigkeit lösen. Daß sich sehr viele Riechstoffe in Wasser nur sehr wenig lösen, ja manche in der Arzneimittelbeschreibung als „unlöslich in Wasser" bezeichnet werden, widerspricht dem nicht. Die sehr geringe Wasserlöslichkeit wird hier eben praktisch der Unlöslichkeit gleichgesetzt. Da aber für die Erregung des Geruchsorgans nur äußerst kleine Mengen Substanz nötig sind, steht nichts der Annahme im Wege, daß die geringe Löslichkeit vieler Riechstoffe, beispielsweise der ätherischen Öle, in der wässerigen Flüssigkeit der Nasenschleimhaut ausreicht, um die Molekeln des Riechstoffs zu den Nervenendigungen gelangen zu lassen.

[1]) Citiert nach v. Vintschgau. — [2]) Zeitschrift f. Anat. u. Entwickelungsgesch. 2 (1870).

Übrigens ist daran zu erinnern, daß viele riechende Substanzen, in die Nähe einer Wasserfläche oder auf diese gebracht, in dieser Wirbelbewegungen erzeugen, bei denen Partikelchen des Riechstoffes unter die Oberfläche hinabgerissen werden, ohne daß zunächst von Auflösung der Substanz im Wasser zu sprechen wäre. Die Auflösung folgt jenem Vermischungsvorgang allerdings in vielen Fällen sogleich nach, z. B. wenn es sich um Alkohol oder Äther handelt.

Ein gutes Reagens auf Riechstoffe, die Wasserschichten irgendwie „durchdringen", obgleich ihre Löslichkeit sehr gering ist, sind manche Wassertiere[1]), z. B. Teichschnecken (Limnaeus) und Blutegel. Nähert man, während ein solches Tier sein Kopfende dem Wasserspiegel auf einige Millimeter nahe gebracht hat, diesem eine mit einem ätherischen Öl befeuchtete Nadel, so ist die Reizwirkung durch die Wasserschicht hindurch unverkennbar (Graber, Nagel). Damit rasche und deutliche Wirkung erzielt werde, darf die Wasserschicht freilich nicht dicker als etwa 2 mm sein. Riechstoffe, die sich im Wasser, von diesem allseitig bespült, befinden, entfalten ihre Reizwirkung nur bei direktem Kontakt mit dem reizbaren Organ, oder höchstens auf kleine Bruchteile eines Millimeters. Dies gilt z. B. für ein Stück Campher in Wasser, oder einen Tropfen Chloroform. Jene Wirbelbewegungen, die die reizende Substanz auf etwas größere Distanzen durchs Wasser verbreiten, treten also offenbar nur an der Trennungsschicht zwischen Luft und Wasser auf.

Über die Art, wie die Riechstoffe die Endigungen des Riechnerven erregen, läßt sich zur Zeit noch gar nichts aussagen, da wir das Wesen des Erregungsprozesses im Nerven überhaupt noch nicht kennen.

Auf Grund eines von E. H. Weber[2]) beschriebenen Versuches hat sich längere Zeit die Meinung erhalten, die zu riechenden Substanzen müßten, um vom Riechorgan wahrgenommen werden zu können, in gas- oder dampfförmiger Gestalt in die Nase gelangen, Flüssigkeiten dagegen, als solche in die Nase gebracht, röchen nicht. Man hat das namentlich im Hinblick auf die Tatsache überraschend gefunden, daß bei den Fischen das Sinnesepithel des ersten Hirnnerven direkt vom Wasser bespült wird.

Der Beweis, daß dieses Sinnesepithel der Perception chemischer Reize diene, fehlt übrigens noch; die Versuche in dieser Hinsicht sind als fehlgeschlagen zu bezeichnen.

Webers Versuch bestand in der Einführung einer Mischung von „Kölnischem Wasser" mit Wasser in die Nase, bei hintenüber gebeugtem Kopfe. Weber empfand bei diesem Versuch keinen Geruchseindruck.

Ein in diesem Zusammenhang oft citierter Versuch von Tourtual aus dem Jahre 1827 bestand in der Einspritzung eines seltsam komplizierten Flüssigkeitsgemisches in die Nase, wobei Tourtual keinen Geruch wahrnahm.

Aronsohn[3]) hat wahrscheinlich gemacht, daß an dem negativen Ausfall des Weberschen Versuchs zum Teil die ungünstigen Versuchsbedingungen schuld waren, unter günstigeren Bedingungen dagegen auch mittels der Th. Weberschen Nasendouche eingebrachte Flüssigkeiten gerochen werden. Wasser, zumal kaltes Wasser, erzeugt in der Nase sofort einen heftigen Reizzustand mit profuser Schleimabsonderung und Beeinträchtigung des Geruchsvermögens, die bis zu stundenlanger völliger Aufhebung des Riechens gehen kann.

---

[1]) Vergl. W. A. Nagel, Vergleichende physiol. u. anat. Untersuchungen über den Geruchs- und Geschmackssinn. Bibliotheca Zoolog. 18 (1894). — [2]) Arch. f. Anat. u. Physiol. 1847. — [3]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1886.

Ob die Beeinträchtigung des Riechvermögens eine direkte Wirkung des Wassers auf die Riechzellen ist, oder sekundär durch die heftige Schleimsekretion bedingt ist, läßt sich zurzeit noch nicht angeben.

Körperwarmes Wasser schädigt wohl auch den Geruchssinn, reizt aber lange nicht so heftig, wie kaltes. Das Riechvermögen bleibt fast intakt, wenn körperwarme (besser noch 40 bis 44° warme) Kochsalzlösung von 0,73 Proz. durch die Nase geleitet wird.

Wenn man nun einer solchen indifferenten Flüssigkeit eine kleine Menge eines Riechstoffes zusetzt, etwa eine Spur Nelkenöl, so wird dies deutlich durch den Geruch erkannt. Zwaardemaker hebt mit Recht hervor und Veress[1]) zeigt durch sorgfältige Versuche, daß das Experiment nicht rein ist; selbst wenn die Flüssigkeit in kontinuierlichem Strom in das eine Nasenloch eingeleitet wird und aus dem anderen wieder ausfließt, ist man keineswegs sicher, daß die Nasenhöhle bis oben hin voll Flüssigkeit ist. Man kann im Gegenteil sicher sein, daß gerade in den obersten Teilen der Nase, die Riechepithel tragen, eine Portion Luft durch die Flüssigkeit abgesperrt gehalten wird, die bei der von Aronsohn angegebenen Haltung (vorn übergebeugter Kopf) auf keine Weise von der Flüssigkeit ausgetrieben werden kann, was bei der Weberschen Anordnung, Einfüllung von Flüssigkeit in die Nase des hintenüber gebeugten Kopfes, wohl sicher erreicht werden dürfte. So könnte also immer noch diese abgesperrte Luft die Rolle des Geruchsträgers übernehmen. Es darf indessen doch als im höchsten Grade wahrscheinlich bezeichnet werden, daß auch bei völliger Ausfüllung der Nase mit Flüssigkeit im Wasser gelöste oder suspendierte Stoffe Geruchsempfindung erzeugen können. Dafür spricht vor allem Aronsohns leicht zu bestätigende Beobachtung der Einwirkung verschiedener, im gewöhnlichen Sinne als geruchlos zu bezeichnender Salzlösungen auf das Geruchsorgan.

Magnesiumsulfat, Natriumphosphat, Kaliumpermanganat und andere erzeugen, in wässeriger Lösung in die Nase gebracht, eine deutliche Geruchsempfindung, die nur durch den direkten Kontakt der Flüssigkeit mit der Riechschleimhaut zu erklären ist.

Die Reizwirkung dieser Salze scheint auf Schrumpfungs- oder Quellungsvorgängen zu beruhen, die sie in der benetzten Nasenschleimhaut herbeiführen. Aronsohn konnte zeigen, daß eine Chlornatriumlösung, die zu wenig konzentriert ist, um für die Nasenschleimhaut indifferent zu sein und den Geruchssinn intakt zu lassen (0,3 bis 0,6 Proz.), durch Zusatz von Natriumsulfat, Natriumbikarbonat, Magnesiumsulfat usw. in geeigneten Mengen indifferent gemacht werden kann. Die Mengenverhältnisse, in denen sich diese Salze vertreten, bezeichnet Aronsohn als „osmoteretische Äquivalente“ (osmoteretisch = gerucherhaltend). Das kleinste osmoteretische Äquivalent hat das Chlornatrium; wird dieses = 1 gesetzt, so ist dasjenige des Natriumbikarbonats 2, Natriumsulfat 4, Natriumphosphat 4, Magnesiumsulfat 6.

Die Salze des Blutserums, in normalen Mengenverhältnissen gemischt, geben ebenfalls eine für die Nasenschleimhaut indifferente Lösung.

b) Die Reizung des Riechorganes mit inadäquaten Reizen.

Von inadäquaten Reizen hat man für das Geruchsorgan bis jetzt nur den elektrischen Strom wirksam gefunden. Die ersten Beobachtungen rühren

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **95**, 368 bis 408, 1903.

von Ritter[1]) her, dessen Angaben indessen nicht ganz klar sind. Unter Umständen sollte der negative Pol eine Andeutung von Ammoniakgeruch, der positive von Säuregeruch bewirken. Da andere Autoren diese Beobachtungen nie haben bestätigen können, liegt wohl ein Irrtum vor, vielleicht bedingt durch Stromschleifen zum Geschmacksorgan („saurer" Geruch!). Wichtiger ist wohl der Befund von Althaus[2]), der bei einem Falle von doppelseitiger Trigeminuslähmung einen „phosphorartigen" Geruch auslösen konnte, wenn er von der Schleimhaut oder Gesichtshaut aus mit starken Strömen galvanisierte.

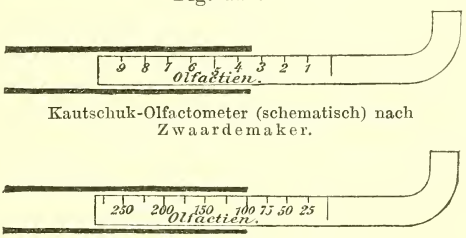
Systematische Versuche hat Aronsohn[3]) hierüber gemacht, der bei sich und anderen die Auslösung eines eigenartigen Geruchs nachweisen konnte, wenn ein Strom durch die mit indifferenter Flüssigkeit (Kochsalzlösung von 0,73 Proz., 38° warm) angefüllte Nase geleitet wurde. Je nachdem sich die Anode oder die Kathode in der Nase befand, waren die Gesetzmäßigkeiten der Erregung verschieden. „Kathodengeruch" entstand bei Schließung der Kette, „Anodengeruch" bei Öffnung. Die indifferente Elektrode konnte an der Stirn oder an der Nase anliegen; bei Applikation an der Hand traten Geschmacksempfindungen störend hinzu. Die Qualität der Empfindung vermochte Aronsohn nicht zu beschreiben, sie soll der Geschmacksempfindung „ähnlich" sein. Bei gleichzeitiger Einwirkung objektiver Riechreize (in Lösung) trat ein Mischgeruch auf, d. h. die jenen Riechstoffen entsprechenden Empfindungen waren modifiziert.

Die thermischen und mechanischen Reize hat man bis jetzt ohne Wirkung auf das Riechorgan gefunden.

V. Olfactometrie und Odorimetrie.

Den sorgsamen Untersuchungen Zwaardemakers (l. c.) haben wir es zu danken, daß wir nunmehr auch brauchbare Methoden zu quantitativen Untersuchungen auf dem Gebiete des Geruchssinnes haben. Unter Olfactometrie versteht Zwaardemaker die messende Untersuchung der Empfindlichkeit des Geruchsorgans für seinen adäquaten Reiz, unter Odorimetrie die vergleichenden Messungen über die Reizwirkung verschiedener Stoffe. Das zu diesen Untersuchungen dienende Instrument, das Olfactometer, wird in seiner einfachsten Form durch die schematische Fig. 111 veranschaulicht. Ein Glasrohr von 5 mm Innendurchmesser wird mit seinem etwas aufwärts gebogenen Ende in ein Nasenloch eingeführt. Über das andere offene Ende wird ein cylindrisches Rohr übergeschoben, das aus einem riechenden Stoff, z. B. Kautschuk oder Wachs, besteht, und von außen durch eine Glashülse umschlossen ist. Atmet man nun

Fig. 111.



Kautschuk-Olfactometer (schematisch) nach Zwaardemaker.

Olfactometer für stärkere Reize.

[1]) Gilberts Ann. d. Physik 7, 448, 1801. — [2]) Deutsch. Arch. f. klin. Medizin 7 (1870). — [3]) Arch. f. Anat. u. Physiol., phys. Abteil., 1884.

durch das Innenrohr ein, so wird die Luft, falls das Kautschukrohr nicht ganz über das Glasrohr übergeschoben ist, erst eine Strecke weit an der Innenfläche des Kautschukrohres entlang streichen müssen, ehe sie in das Glasrohr und die Nase eintritt. Eine Holzplatte verdeckt die Einstellung des Riechrohres für den Untersuchten. Zwaardemaker hat nun gezeigt, daß die Intensität des von einem Objekt ausgehenden Geruches ceteris paribus der ausdünstenden Oberfläche proportional ist. Somit kann auch im Olfactometer die Intensität des Riechreizes auf einfache Weise reguliert werden, je nachdem man das Kautschukrohr mehr oder weniger weit über das Glasrohr überschiebt, die geruchgebende Fläche also variiert.

Zur Verwendung von flüssigen Riechstoffen können auch poröse Tonzylinder über das gläserne Riechrohr übergeschoben werden, die man zuvor mit der betreffenden Flüssigkeit durchtränkt hat.

Als Einheit für quantitative Untersuchungen schlägt Zwaardemaker den Reiz vor, der von einem mit Kautschuk armierten Riechmesser geliefert wird, in welchem ein 1 cm langes Stück des Kautschukrohres als Duftfläche zur Wirkung kommt. Ein solcher Reiz entspricht ungefähr dem Minimum perceptibile für ein normales Riechorgan. Diese Einheit wird als Olfactie bezeichnet; ein Riechorgan, das diesen Reiz eben wahrnimmt, hat die Riechschärfe 1. Sind 7 cm Kautschukrohr = 7 Olfactien nötig, um einen eben wahrnehmbaren Reiz zu erzeugen, so ist die Riechschärfe $^1/_7$ usw.

Ein Kautschukolfactometer kann also nach Olfactien graduiert werden. Mit anderen Riechstoffen armiert, ist natürlich auch der Reizwert von 1 cm Ausdünstungsfläche ein anderer. So empfiehlt Zwaardemaker für Applikation stärkerer Riechreize (25 bis 250 Olfactien) eine Röhre von „Kunsthorn“ (Ammoniacum-Guttapercha). Hier entspricht 1 cm 30 Olfactien.

Obgleich die von Zwaardemaker gewählte Einheit willkürlich und nicht genau reproduzierbar ist, muß ihre Aufstellung unter den gegebenen Verhältnissen doch immerhin als ein großer Fortschritt betrachtet werden. Das Olfactometer ermöglicht messende Versuche an Gesunden wie an Kranken mit alterierter Geruchsschärfe.

Odorimetrische Untersuchungen über die „Riechkraft“ verschiedener Stoffe lassen sich mit dem Olfactometer anstellen, indem aus festen Stoffen Zylinder von gleichen Dimensionen wie das erwähnte Kautschukrohr geformt werden, flüssige Stoffe dagegen zur Durchtränkung der porösen Tonzylinder benutzt werden. Statt der letzteren können auch aus Filtrierpapier gerollte Zylinder (mit einem Drahtgeflecht als Stütze) dienen, die sich schneller durchtränken.

Für die praktischen Bedürfnisse des Nasenarztes und Nervenarztes dürfte Zwaardemakers olfactometrische Methode alle anderen bisher angegebenen überflüssig machen. Wenige Worte seien indessen noch über diese wegen des theoretischen Interesses einiger Punkte gesagt.

Valentin[1]) brachte kleine Mengen einer riechenden Substanz in einen großen Glasballon und stellte so annäherungsweise fest, ein wie großes Quantum Luft durch eine bestimmte Substanzmenge noch riechend gemacht werden kann. Auch tropfte er riechende Flüssigkeiten in große Portionen Wasser

[1]) Lehrbuch der Physiologie, 4. Aufl., 1855, S. 667.

und prüfte dieses dann durch den Geruch. So stellte er die kleinsten, absoluten, zur Geruchsempfindung eben noch notwendigen Mengen einiger Riechstoffe fest. Es ergab sich z. B. für Rosenöl $^1/_{200\,000}$ mg, für Moschustinktur $^1/_{2000\,000}$ mg als minimale wahrnehmbare Menge.

Fröhlich[1]) verglich die Riechschärfe verschiedener Personen, indem er die Entfernung des Riechstoffes von der Nase bestimmte, in der noch gerochen werden konnte. Die Riechstoffe waren mit Stärkemehl so gemischt, daß alle Mischungen aus der Nähe ungefähr gleich stark rochen. Diese unvollkommene Methode wird auch jetzt noch von Einigen angewandt.

Die Bestimmung der absoluten Menge eines Riechstoffes, die zur Erzeugung eines Geruches eben hinreicht, nahmen Fischer und Penzoldt[2]) nach dem Valentinschen Verfahren wieder auf. 0,01 mg Mercaptan erfüllten einen Luftraum von 230 cbm mit dem charakteristischen Geruch. Auf den Cubikdecimeter Luft kommt nach dieser Feststellung $^1/_{23\,000\,000}$ mg Mercaptan, wovon natürlich zur Erzeugung der Geruchsempfindung wiederum nur ein kleiner Bruchteil nötig ist. Chlorphenol hat den hundertsten Teil der Riechkraft des Mercaptans.

Eingehende systematische Versuche in gleicher Richtung hat Passy[3]) veröffentlicht. Er löst Riechstoffe in Alkohol und bringt durch successive Verdünnung mit Alkohol Lösungen von sehr geringen und dabei genau bekannten Konzentrationen zustande. Von diesen Lösungen bringt er einen kleinen Tropfen in eine reine leere Literflasche und läßt dann durch Riechen an der Flaschenmündung feststellen, ob noch ein Geruchseindruck auftritt. Alle Fehlerquellen wirken dabei in gleichem Sinne und lassen den Wert des Minimum perceptibile etwas zu hoch erscheinen. Einige seiner Schwellenwerte, in Milligramm pro Liter Luft ausgedrückt, seien im folgenden aufgeführt.

Orangenessenz	0,0005 bis 0,001
Wintergrünessenz	0,0005 „ 0,001
Rosmarin	0,00005 bis 0,002
Äther	0,0005 „ 0,005
Campher	5
Citral	0,5 bis 0,1
Heliotropin	0,1 „ 0,05
Cumarin	0,05 „ 0,01
Vanillin	0,05 „ 0,0005
Natürlicher Moschus	0,01
Künstlicher Moschus	0,00001 bis 0,000005

Vergleichende Untersuchungen über die Riechschärfe verschiedener Personen haben zunächst ergeben, daß zwischen Männern und Weibern ein durchgreifender Unterschied nicht zu bestehen scheint.

Die Angaben von Toulouse und Vaschide[4]) und Ottolenghi[5]) widersprechen sich hier direkt. Derartige Statistiken können nicht skeptisch genug aufgenommen werden. Meinen eigenen Erfahrungen nach halte ich den Geruchssinn der Frauen im allgemeinen für den schärferen.

---

[1]) Sitzungsber. d. k. Akad. Wien, 1851. — [2]) Liebigs Annal. d. Chemie 239, 131, 1887. — [3]) Compt. rend. Soc. de biolog. 1892. — [4]) Compt. rend. Soc. de biolog. 1899. — [5]) Riv. di Psicol., Psichiatr. e Nevropat. 2 (1898).

Kinder sollen nach Toulouse und Vaschide die höchste Riechschärfe besitzen; die Vergleichszahlen für das Minimum perceptibile geben die Autoren folgendermaßen an:

Kinder : Weiber : Männer = 5 : 70 : 900.

Doch möchte ich, wie gesagt, vor Verallgemeinerung warnen.

Die häufig gehörte Behauptung, Frauen hätten infolge des Parfümmißbrauches abgestumpften Geruchssinn, entbehrt jeglicher tatsächlichen Grundlage. Richtig scheint zu sein, daß Raucher etwas abgestumpften Geruch haben, nach Griesbach[1]) im Mittel zwei Fünftel der Norm. Derselbe Autor hat die Irrlehre widerlegt, daß bei Blinden wegen des fehlenden Sehvermögens die übrigen Sinne eine „kompensatorische" Verfeinerung zeigten; den Geruchssinn Blinder fand Griesbach im Durchschnitt von geringerer Schärfe als bei Sehenden.

Wie beim Geschmackssinn findet man auch beim Geruchssinn die eben überschwelligen Reize ihrer Qualität nach häufig unbestimmt. Erst bei etwas intensiverem Reiz folgt auf die generelle[2]) Schwelle die spezifische. In den Untersuchungen von Toulouse und Vaschide kommt dieser schon von Nicque[3]) erkannte Unterschied deutlich zum Ausdruck.

VI. Die Qualitäten der Geruchsempfindung. Klassifizierungsversuche.

Die Zahl der unterscheidbaren Geruchsqualitäten ist außerordentlich groß, aber auch nicht in der entferntesten Annäherung angebbar. Der Geruchssinn nimmt darin eine Sonderstellung unter den Sinnen ein, daß jeder Mensch täglich in die Lage kommen kann, neue Qualitäten dieses Sinnes zu empfinden, d. h. neue Gerüche kennen zu lernen, die er bisher nie empfunden hat. Daraus ergibt sich schon, daß im Geruchsorgan die Bedingungen für das Zustandekommen fast unendlich mannigfaltiger Empfindungen gegeben sind, die tatsächlich bei sehr vielen Menschen nur zu einem kleinen Teil wirklich einmal ausgelöst werden. Nehmen wir beispielsweise so charakteristische Geruchsempfindungen, wie sie durch die Osmiumsäure oder das Formalin ausgelöst werden: wie viele Menschen gibt es, deren Geruchsorgan diese Gerüche nie empfunden hat! Kommt ein im Beobachten geübter Mensch in die Lage, zum ersten Mal den Geruch der Osmiumsäure zu riechen, so wird er sofort erkennen, daß es sich hier um eine für ihn völlig neue, mit allen ihm bekannten unvergleichbare Empfindungsqualität handelt. Unter diesen Umständen wird man nie behaupten können, die Zahl der überhaupt möglichen Gerüche sei bekannt.

Ein Grund für die Existenz so zahlreicher Geruchsqualitäten liegt in der Art, wie sich Geruchsempfindungen mischen (s. u. S. 614). Sie tun das, wie weiter unten noch näher auszuführen sein wird, mit einer gewissen Annäherung an die Mischungsweise der Gesichtsempfindungen; in der Mischung sind die Komponenten wenigstens unter gewissen Bedingungen nicht unterscheidbar und es gibt überhaupt Mischempfindungen im Gebiete des Geruchssinnes, deren Empfindungsqualität das Gemischte gar nicht direkt erkennen

[1]) Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. 75. — [2]) Bezüglich dieser Bezeichnung vergl. oben 3, 19. — [3]) Thèse, Lyon 1897.

läßt. Infolge hiervon sind zwischen den verschiedensten Paaren von Gerüchen Übergänge möglich, die die Zahl der unterscheidbaren Qualitäten ins Unendliche vermehren.

Besonders auffällig ist dieses Verhalten des Geruchssinnes im Gegensatz zum Geschmackssinn mit seiner geringen Zahl von scharf unterschiedenen Empfindungsqualitäten, zwischen denen Mischungen und Übergänge doch eigentlich nur andeutungsweise vorkommen. Dieser Unterschied prägt sich in den Namen aus, die wir für die Empfindungsqualitäten im Gebiet der beiden Sinne haben: Von den Geschmacksqualitäten haben wenigstens drei eigene Namen (süß, bitter, sauer); die Geruchsqualitäten werden sämtlich nach bestimmten Gegenständen benannt, die die betreffende Geruchsempfindung erfahrungsgemäß bewirken oder nach Vorgängen, bei denen erfahrungsgemäß der betreffende Geruch sich entwickelt (faulig, brenzlig usw.). Selbst die Namen, mit denen man größere Gruppen von unter sich ähnlichen Gerüchen zusammenfaßt, zeigen größtenteils die Anlehnung an die Benennung gewisser Substanzen (balsamisch, würzig usw.).

Hinsichtlich der Verschiedenheit der Mischungserscheinungen beim Geruch und beim Geschmack ist übrigens zu bedenken, daß erstens die geringe Zahl der „einfachen" Geschmacksarten die Analyse von Mischungen durch den Geschmackssinn sehr erleichtert, zweitens aber auch die sehr deutlichen Verschiedenheiten der einzelnen Partien der Mundschleimhaut in ihrer Empfänglichkeit für die einzelnen Geschmackseindrücke ebenfalls ein Auseinanderfallen des Mischeindrucks in seine Komponenten begünstigen muß. Eine zugleich sauer und bitter schmeckende Flüssigkeit z. B. wird an der Zungenspitze sauer, am Zungengrunde mehr bitter schmecken und schon dadurch viel deutlicher den Geschmack als Mischgeschmack erkennen lassen, als es bei einer Mischung verschiedener Gerüche der Fall ist. Bei diesen scheint, soweit unsere Erfahrungen reichen, eine qualitative Verschiedenheit der ausgelösten Empfindungen beim Auftreffen auf verschiedene Teile der Riechschleimhaut nicht vorzukommen.

Unter diesen Umständen müssen alle Versuche zu einer ins einzelne gehenden Klassifikation der Gerüche nach ihrer Qualität von vornherein aussichtslos erscheinen. Es lassen sich wohl einzelne Gruppen von Gerüchen herausheben, in der Art, daß in je einer solchen Gruppe Gerüche vereinigt werden, die unter sich ähnlich sind, denen der anderen Gruppen dagegen entschieden unähnlich. Bei dem Versuch, irgend welche bekannte Geruchsqualität dieser oder jener Gruppe einzuordnen, mit anderen Worten, die bekannten Qualitäten in ein System zu bringen, stößt man jedoch alsbald auf Schwierigkeiten. Man müßte jedenfalls sehr zahlreiche Gruppen von zusammengehörigen Geruchsqualitäten aufstellen, viel zahlreicher, als es bei den bisherigen Klassifizierungsversuchen geschehen ist.

Werfen wir einen Blick auf diese, so können wir einige Versuche, die Gerüche vom psychologischen Standpunkt aus zu klassifizieren, als für die Physiologie kaum bedeutungsvoll kurz erledigen. A. v. Haller teilte die Gerüche, je nachdem sie Lust oder Unlust erregen, ein in

Odores suaveolentes,
Odores intermediae und
Foetores.

Schon die erheblichen Unterschiede in der Beurteilung dessen, was Wohlgeruch und was Gestank ist, lassen eine solche Einteilung als unfruchtbar erkennen.

Komplizierter und für die Physiologie ebenfalls unfruchtbar ist eine Einteilung nach der psychologischen Bedeutung der Gerüche, die Giessler[1]) gegeben hat.

Als irrationell muß die auch von Zwaardemaker adoptierte Einteilung Fröhlichs[2]) in „reine" und „scharfe" Riechstoffe bezeichnet werden, da hierbei ein sekundäres, nebensächliches Moment als Grundlage für die Einteilung verwendet wird und außerdem, wie bekannt, die Beimischung stechender usw. Empfindungen zu der eigentlichen Geruchsempfindung sehr von der Intensität des Reizes abhängt. Es gibt nicht sehr viele Riechstoffe, die bei intensiver Einwirkung nicht derartige „Schärfe" erkennen ließen, die also, wenn sie in Dampfform in die Nase eines total Anosmatischen gelangen, bei diesem keinerlei Empfindung erzeugten. In der Empfindungsqualität selbst aber liegt nichts, was eine auch nur annähernd präzise Durchführung der Teilung im Sinne Fröhlichs ermöglichte. So sind denn auch zahlreiche von den Stoffen, die Zwaardemaker unter den „rein olfactiven" Riechstoffen aufzählt, genau genommen ganz entschieden zu den „scharfen" zu rechnen. Oleum juniperi und bergamottae z. B. reizen die Schleimhäute der Nase und ebenso der Conjunctiva sehr intensiv. Selbst den Campher müßte man zu den scharfen Stoffen rechnen.

Die Konsequenzen der Trennung in scharfe und reine olfactive Riechstoffe zeigen sich nun auch z. B. bei Zwaardemakers Klassifizierung darin, daß ein großer Teil der bekannten Gerüche, die eine deutliche „scharfe" Komponente aufweisen, aus seiner Klassifizierung ausgeschlossen sind und man nicht recht weiß, wohin sie zu rechnen wären. Der Gedanke von Zwaardemaker ist ja wohl der, daß unter den scharfen Gerüchen eine analoge Teilung in neun Klassen zu erfolgen hätte, wie unter den olfactiven Stoffen.

Die neun Klassen, die Zwaardemaker, sich im wesentlichen an Linné anlehnend, aufstellt, sind die folgenden:

1. Odores aetherei (ätherische Gerüche), Lorry.
2. Odores aromatici (aromatische Gerüche), Linné.
3. Odores fragrantes (balsamische Gerüche), Linné.
4. Odores ambrosiaci (Amber-Moschus-Gerüche), Linné.
5. Odores alliacei (Allyl-Kakodyl-Gerüche), Linné.
6. Odores empyreumatici (brenzlige Gerüche), Haller.
7. Odores hircini (Capryl-Gerüche), Linné.
8. Odores tetri (widerliche Gerüche), Linné.
9. Odores nauseosi (Erbrechen erregende oder ekelhafte Gerüche), Linné.

Wie man sieht, ist hier in den Klassen 8 und 9 das affektive Moment eingeführt, das die Klasse 8 äußerst unbestimmt, und die Klasse 9 insofern unzutreffend charakterisiert, als man von Erbrechen erregenden Gerüchen gar nicht allgemein sprechen kann.

Wohin würde nun der Geruch der Osmiumsäure, der Essigsäure, des Ammoniaks, der schwefligen Säure zu rechnen sein? Und mit welchem Rechte kann man den Geruch des Chlors, des Formaldehyds, so exquisit

[1]) Wegweiser zu einer Psychologie des Geruchs. Hamburg und Leipzig (Voss), 1894. — [2]) Sitzungsber. d. k. Akad. Wien, 1851.

„scharfe“ Gerüche, in das System einreihen, jene aber beiseite lassen, wie es Zwaardemaker tut?

Auch über die subjektive Ähnlichkeit der von Zwaardemaker in eine Klasse zusammengestellten Gerüche kann man so verschiedener Meinung sein, daß man geneigt sein könnte, einem solchen Klassifikationsversuche jeglichen wissenschaftlichen Wert abzusprechen, wenn nicht durch die Untersuchungen der letzten Jahre ein neues Moment in dieser Frage aufgetreten wäre, das ernste Beachtung verdient und von Zwaardemaker zur Stütze seiner Klassifikation verwandt worden ist. Zwaardemaker findet nämlich, daß sowohl die Aronsohnschen Versuche über partielle Ermüdung des Riechorganes, wie die Erfahrungen über partielle Anosmien und über Parosmien geeignet sind, jene Gruppierung der Gerüche experimentell zu begründen. Es ist unbedingt zuzugeben, daß hiermit erst der Weg zu einer wissenschaftlichen Einteilung der Gerüche gewiesen zu werden scheint.

Das Material zu ihrer Durchführung freilich ist noch überaus dürftig und mit seiner Verwertung durch Zwaardemaker kann ich mich, wie sich aus dem Folgenden ergeben wird, nicht in allen Punkten einverstanden erklären. Wir müssen uns darüber klar sein, daß die Einteilung in die neun Klassen unter allen Umständen nur eine vorläufige Bedeutung haben kann, und daß es unzweckmäßig wäre, wollten wir uns bei ihr beruhigen. Es scheint mir übrigens, als ob auch Zwaardemaker selbst seine Klassifikation zunächst mehr als eine provisorische gedacht hat, und sie namentlich nicht in allen Einzelheiten aufrecht halten würde. Es erscheint daher dringend wünschenswert, daß vor allen Dingen neue tatsächliche Erfahrungen auf den Gebieten gesammelt werden, aus denen Zwaardemaker die experimentellen Grundlagen einer Geruchsklassifikation herzuleiten sich bemüht hat; es würde damit das Verdienst Zwaardemakers um die Geruchsphysiologie besser gewürdigt werden, als wenn man sich kritiklos ohne weiteres an die von ihm skizzierte Hypothese über die Komponentengliederung des Geruchssinnes binden wollte, wozu ich eine gewisse Geneigtheit in manchen neueren Publikationen bemerke.

Partielle Ermüdung des Riechorganes zeigt sich nach längerer Einwirkung von Geruchsreizen. Ist das Riechorgan für einen bestimmten Geruch ermüdet, so daß es ihn nicht mehr oder fast nicht mehr wahrnimmt, so ist die Empfindlichkeit für gewisse andere Gerüche (die mit jenem ermüdenden eine subjektive Ähnlichkeit haben) ebenfalls mehr oder weniger deutlich herabgesetzt, während gewisse andere Gerüche anscheinend mit unverminderter Deutlichkeit wahrgenommen werden. So konnten nach vollkommener Ermüdung für Jodtinkturgeruch einige ätherische Öle und Äther ungeschwächt gerochen werden, für andere ätherische Öle war der Geruch geschwächt, für Alkohol und Copaivabalsam völlig abgestumpft. Bei Ermüdung für Schwefelammonium bestand völlige Unempfindlichkeit auch für Schwefelwasserstoff, Chlorwasserstoff und Brom, während ätherische Öle und Cumarin ungeschwächt gerochen werden (Aronsohn). Auch Zwaardemaker[1]) und ich[2]) haben über ähnliche Versuche berichtet. Besonders überzeugend ist die folgende

[1]) „Physiol. d. Geruches“ u. Arch. f. Anat. u. Physiol., phys. Abteil., 1900. — [2]) Zeitschr. f. Psych. und f. Physiol. d. Sinnesorgane 15.

Versuchsanordnung: Man mischt zwei Riechstoffe, die sich chemisch nicht beeinflussen, z. B. Cumarin und Vanillin, in wässerigen Lösungen in solchem Verhältnis, daß nur der Vanillegeruch wahrnehmbar ist. Nun ermüdet man durch längeres Riechen an reiner Vanillinlösung das Riechorgan bis zur Unempfindlichkeit für diese Qualität und riecht nun wieder an der erwähnten Mischung. Diese, die vorhin nur nach Vanillin roch, riecht jetzt nur nach Cumarin. Zu bemerken ist übrigens hierbei, daß Cumarin und Vanillin nach Zwaardemaker nicht nur zur gleichen Geruchsklasse, sondern auch zu derselben Unterabteilung gehören, die Ermüdung für den einen Geruch also eigentlich auch Ermüdung für den anderen zur Folge haben sollte.

Die Sachlage ist bezüglich der partiellen Ermüdbarkeit des Riechorganes noch nichts weniger als klar; es harrt noch mancher Punkt der Aufklärung und es bedarf namentlich noch einer großen Reihe von tatsächlichen Beobachtungen. Dasselbe gilt nun auch für die partiellen Geruchsdefekte, deren teils erworbenes, teils congenitales Vorkommen allerdings unbestreitbar ist. Zwaardemaker hat in einem bestimmten Stadium der (unvollständigen) Cocain-Anosmie die Empfindlichkeit für verschiedene Gerüche geprüft und sehr ungleich gefunden. Überraschen muß es auch hier wieder, Gerüche einer und derselben Zwaardemakerschen Klasse teils als solche genannt zu sehen, die ungeschwächt gerochen werden, teils auch als solche, für welche die Empfindlichkeit aufgehoben ist. Rollett [1]) fand nach einer unabsichtlich durch Eingießung von Gymnemasäure erzeugten totalen Anosmie eine langsame, durch Monate sich hinziehende Restituierung des Geruchssinnes, bei der die einzelnen Geruchsqualitäten nach sehr ungleicher Zeit wiederkehrten.

Als sichergestellt kann es gelten, daß partielle Anosmien durch längere Zeit oder dauernd bestehen können. Zwaardemaker berichtet von solchen als postdiphtheritische Erscheinung. Mir erzählte ein guter Beobachter, der englische Chemiker D. H. Nagel, daß für ihn der spezifische Geruch der Blausäure nicht wahrnehmbar ist, er also auch nicht verstehen kann, wie man zwischen dem Blausäuregeruch und dem Geruch des Bittermandelöls eine Ähnlichkeit finden kann. Dieselbe Anomalie hat Nagel bei einer Anzahl seiner Schüler bemerkt, die im übrigen, wie er selbst, für andere Gerüche vollkommen gute Riechschärfe haben.

Öfters findet man eine angebliche partielle Anosmie erwähnt, an der Johannes Müller gelitten haben soll; tatsächlich gab Müller nur an, daß Reseda „ihm nicht sehr sublim, sondern mehr krautartig“ roch. Daraus dürfte aber jene Anomalie noch kaum zu diagnostizieren sein.

Alles in allem genommen, scheinen mir die Erfahrungen sowohl über partielle Ermüdung wie über partielle Defekte des Riechorganes zu dem Schlusse zu berechtigen, daß eine Komponentengliederung im Geruchsorgan angenommen werden kann und muß, in der Art, daß sich die Empfindlichkeit für die verschiedenen Geruchsreize auf verschiedene percipierende Apparate (Riechsinnessubstanzen) verteilt, ganz ähnlich wie dies ja für den Geschmackssinn anzunehmen ist. Eine Stütze der Komponententheorie, wie sie speziell Zwaardemaker ausgearbeitet hat, kann ich, wie oben bemerkt, in den bis jetzt bekannten Tatsachen nicht finden. Wir werden jedenfalls gedrängt,

[1]) Archiv f. d. ges. Physiol. 74.

wesentlich zahlreichere, durch „spezifische Energie“ geschiedene Sinnessubstanzen im Riechorgane anzunehmen als beim Geschmackssinn. Selbst mit den neun Klassen Zwaardemakers und ihren Unterabteilungen kämen wir, wie schon das oben erwähnte Beispiel (Cumarin-Vanillin-Ermüdung) zeigt, nicht aus.

Bei dem Mangel an hinreichenden positiven Beobachtungen erscheinen weitergehende Spekulationen zur Zeit unfruchtbar. Insbesondere fehlt jeder Hinweis darauf, ob man die verschiedenen spezifischen Energien des Geruchsorganes an getrennte morphologische Elemente gebunden denken soll, wie es beim Geschmackssinn wenigstens als möglich erscheint. Die Perceptionsorgane gar in der Weise verteilt zu denken, daß eine bestimmte Zone der Riechschleimhaut für die ätherischen Gerüche, eine andere für die Caprylgerüche usw. reserviert wäre, — eine an sich schon sehr wenig plausible Annahme, — dazu fehlt jeder tatsächliche Anhalt. Das Unternehmen Zwaardemakers, eine Anordnung der Riechelemente in neun senkrechten Reihen von vorn nach hinten, entsprechend den neun Geruchsklassen, und in den einzelnen Reihen von oben nach unten wieder eine „skalenbildende Schattierung“ wahrscheinlich zu machen, muß um so mehr als geradezu phantastisch bezeichnet werden, als nicht einmal für die Annahme ein zureichender Grund vorliegt, daß die Riechelemente verschiedener spezifischer Energie überhaupt eine getrennte räumliche Anordnung aufweisen.

Als sicher kann jedoch gelten, daß die sog. „scharfe“ Komponente vieler, sowie die Geschmackskomponente mancher Gerüche durch besondere, vom Olfactorius getrennte Nervenelemente percipiert wird. Für erstere sind die Trigeminusendigungen in der Nase, für letztere die Glossopharyngeus- und Vagusendigungen im Mund und Rachen als Perceptionsorgane anzusehen. Die Anschauung von Zwaardemaker[1]), die Geschmackskomponente (z. B. von Chloroform und Äther) würde in den von Disse entdeckten knospenartigen Gebilden der Regio olfactoria percipiert, hat wenig für sich, ganz abgesehen davon, daß jene Knospen jetzt von den Anatomen gar nicht für Sinnesorgane gehalten, sondern als drüsige Gebilde aufgefaßt werden. Zwaardemaker zog den erwähnten Schluß daraus, daß der Ficksche Versuch (s. o. S. 597) auch für das „gustatorische Riechen“, wie Zwaardemaker es nennt, zutrifft, d. h., daß auch Chloroformdämpfe in den vorderen Teil des Nasenloches geleitet werden müssen, um süßen Geschmack beim Einatmen zu erzeugen. Ich kann diese Angabe nicht bestätigen; wichtiger noch scheint mir die leicht zu konstatierende Tatsache, daß Chloroformdämpfe, die bei gehobenem Gaumensegel (man nimmt z. B. die Mundstellung für den Vokal i ein) mittels eines Gummiballons in die Nase geblasen werden, dort zwar intensiven Geruch nach Chloroform und auch die bekannten sensiblen Reizungen erzeugen, während der Empfindung nicht das mindeste Süßliche mehr anhaftet. Der Geruch des Chloroforms ist nicht süßlich, er wird es erst durch die Geschmackskomponente.

Dieser von mir häufig ausgeführte Versuch[2]) steht in Widerspruch mit der Auffassung Zwaardemakers, läßt sich dagegen mit der Hypothese Rolletts[3]) wohl vereinigen, die dahin geht, daß die obere (hintere) Seite des

[1]) Arch. f. Anat. u. Physiol., phys. Abt., 1903. — [2]) Vgl. hierzu die Mitteilungen von Beyer und von mir in Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. der Sinnesorg. **35** (1904). — [3]) Archiv f. d. ges. Physiol. **74**.

Gaumensegels der Ort des gustatorischen Riechens sei. Daß diese Partie des Gaumensegels zum Schmecken befähigt sei, ist auch mir auf Grund eigener Beobachtungen wahrscheinlich, und wenn man annimmt, daß die hypothetischen Geschmacksorgane nur ganz nahe dem freien Rande des Gaumensegels plaziert sind, auf der freien oberen Fläche aber fehlen, so wäre erklärt, warum bei dem von mir beschriebenen Versuch der Einblasung von Chloroformdämpfen die Süßempfindung ausbleibt, wenn das Gaumensegel gehoben ist: der geschmacksempfindliche Teil desselben ist dann fest an die hintere Pharynxwand angedrückt und für den Reiz des Chloroformdampfes unzugänglich. Auch Gradenigos Versuch[1]): Aufhebung der Süßempfindung im Mund und Rachen durch Bespülung mit Gymnemasäure hebt die Süßempfindung beim Einatmen von Chloroform nicht auf — steht hiermit wohl im Einklang.

Sehr wahrscheinlich ist übrigens auch eine Beteiligung der Geschmacksknospen im Kehlkopf an dem gustatorischen Riechen (Zwaardemaker).

Über die theoretische Bedeutung der Ähnlichkeit von Geruchs- und Geschmacksempfindungen vgl. oben **3**, 10 ff.

VII. Die Unterschiedsempfindlichkeit.

Die Unterschiedsempfindlichkeit des Riechorganes ist wegen der Schwierigkeit und der für diese Zwecke doch kaum ausreichenden Genauigkeit quantitativer Vergleiche zwischen verschiedenen Geruchsempfindungen schwer exakt zu bestimmen. Zwaardemaker konnte zeigen, daß wenigstens eine Annäherung an das nach dem Weberschen Gesetz zu erwartende Verhalten erkennbar ist; bei schwachen Reizen in der Nähe der einfachen Schwelle ist ein geringerer Reizzuwachs bemerklich als bei deutlich überschwelligen Reizen. Die Untersuchungen von Gamble[2]), Toulouse und Vaschide[3]) über die Unterschiedsschwellen beim Geruchssinne führen zu ganz ähnlichen Resultaten.

Durch Übung kann die Leistung des Geruchssinnes ganz außerordentlich verfeinert werden, wie die überraschende Feinheit der Unterscheidung bei Personen beweist, die von Berufs wegen häufig Tee- oder Tabakssorten prüfen. Natürlich handelt es sich hier um Erhöhung der Unterschiedsempfindlichkeit für Qualitäten, nicht etwa um eine durch Übung bedingte Verschiebung der einfachen Schwelle. Ob solche überhaupt vorkommt, ist mir nicht bekannt.

VIII. Die zeitlichen Verhältnisse der Geruchsempfindung.

Bestimmungen der Reaktionszeit der Geruchseindrücke, die mehrfach vorgenommen worden sind (Moldenhauer[4]), Buccola[5]), Beaunis[6]), Zwaardemaker) bieten dem Physiologen wenig Interesse, da die Präzision in der Applikation des Reizes beim Riechorgan bei allen bisher angewandten Verfahrungsweisen doch immer eine so geringe ist, daß den gewonnenen Zahlen keine größere Bedeutung zuerkannt werden kann. Es handelt sich um Reaktionszeiten von 0,2 bis 0,8 Sekunden. Beim „schnüffelnden" Einatmen erfolgte die Reaktion schneller als beim gewöhnlichen ruhigen Einatmen.

Ob Nachdauer der Gerüche über die eigentliche Reizung hinaus vorkommt, ist nicht bekannt. Daß man manche Gerüche noch stundenlang nach der Einwirkung des objektiven Geruches wahrnimmt, dürfte zum größten Teil auf einem objektiven Haften der Riechstoffe in irgend einem Teile der Nase beruhen. Solche Nachgerüche treten oft nach langer Pause plötzlich wieder deutlicher auf.

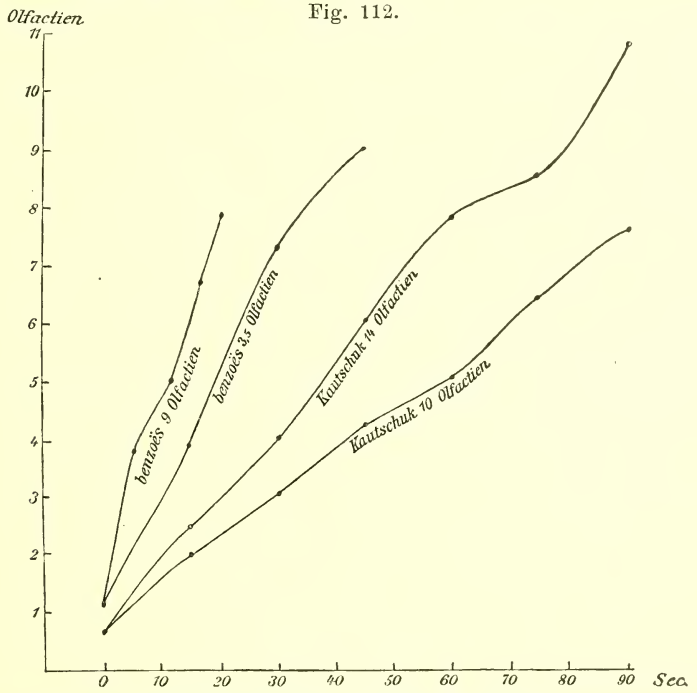
---

[1]) Ann. di Laryng. ed Otol. etc. 1900. — [2]) Amer. Journ. Psychol. **10** (1898). — [3]) Compt. rend Soc. biolog. 1899. — [4]) Philosoph. Studien von W. Wundt, **1**, 616, 1883. — [5]) Arch. ital. Biolog. **5** (1884). — [6]) Compt. rend. Acad. Scienc. Paris, **96**, 387, 1883.

IX. Ermüdung des Geruchssinnes.

Auch die über Ermüdung des Riechorganes bis jetzt vorliegenden Untersuchungen können nur den Wert vorläufiger Orientierungsversuche haben. Führt man die Gerüche bei der Atmung ein, so ist die Reizung der Riechschleimhaut eine intermittierende; in jeder Atempause erholt sich das Organ wieder, um so mehr, je langsamer die einzelnen Atemzüge sich folgen. Selbst in einer mit einem Geruch gleichmäßig erfüllten Luft werden, wenn wir der Annahme Ficks[1]) von einer schnellen Absorption der Gerüche durch die Nasenschleimhaut zustimmen, in jeder Atmungsperiode Zeiten eintreten, in denen der Riechreiz zum mindesten stark vermindert wird. Solange also keine Versuche mit kontinuierlicher Zuleitung des Riechreizes zum Riechorgane vorliegen, haftet den Angaben über Ermüdung des Geruches viel Unsicherheit an. Bei stärkeren Gerüchen ist es mir in der Tat unmöglich, sie selbst bei beliebig langer Einatmung ganz zum Erlöschen durch Ermüdung zu bringen. Bei schwächeren gelingt es wohl, allein ein etwas tieferer Atemzug läßt auch in dem ermüdeten Riechorgan die Empfindung alsbald wieder über die Schwelle treten.

Fig. 112.



Geruchs-Ermüdungskurven nach Zwaardemaker.
Die Ordinaten der Kurven geben an, wie der Geruchs-Schwellenwert zeitlich ansteigt, wenn der Geruch eine bestimmte Zahl von Sekunden hindurch mit einem Geruchsreiz von 10 bzw. 14 Olfactien Kautschuk oder 3,5 bzw. 9 Olfactien Benzoe ermüdet worden war.

Aronsohn bestimmte die „Geruchsdauer“ für Jodtinktur zu 4 Minuten, Copaivabalsam 3 bis 4 Minuten, Campher 5 bis 7 Minuten, Schwefelammonium 4 bis 5 Minuten usw.

[1]) Lehrbuch der Anat. u. Physiol. d. Sinnesorgane. Lahr 1864. S. 102.

Präziser und zuverlässiger sind die Resultate, die Zwaardemaker gewann, indem er durch sein Olfactometer abgestufte konstante Reize anwandte, alle zwei Sekunden einatmete und nach je 15, 30 usw. Sekunden mittels eines anderen Olfactometers schnell die Reizschwelle für die betreffende Geruchsqualität bestimmte. Auf diese Weise wurden „Ermüdungskurven" gewonnen, wie sie die Fig. 112 (a. v. S.) zeigt.

Bei häufig wiederholten Ermüdungsversuchen mit eingeschobener Erholungspause fand Aronsohn die Geruchsdauer immer kürzer werdend.

Auf die Ermüdbarkeit des Riechorganes ist es zum Teil zurückzuführen, daß Kranke, die einen übelriechenden Atem haben, dies häufig selbst nicht bemerken.

Der Tatsache, daß das Geruchsorgan partiell, d. h. nur in einzelnen seiner Komponenten ermüdet werden kann, wurde schon oben in anderem Zusammenhange gedacht (S. 609).

X. Mischungs- und Kompensationserscheinungen auf dem Gebiete des Geruchssinnes.

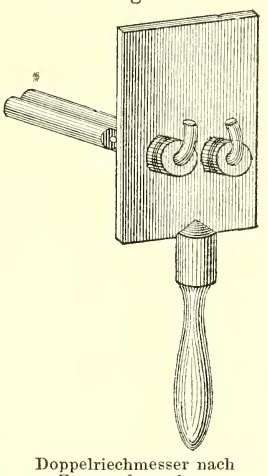
Über diese Frage hat Zwaardemaker zuerst umfassendere Untersuchungen mitgeteilt, nachdem Aronsohn einige darauf bezügliche Versuche kurz erwähnt hatte. In der Medizin und Pharmazeutik, sowie in der Praxis des täglichen Lebens macht man häufig von der Tatsache Gebrauch, daß ein Geruch den anderen verdecken, ja ganz aufheben kann. Dabei sind nun allerdings sehr verschiedenartige Fälle möglich. Einmal können riechende Gase oder Dämpfe durch den Zutritt anderer gasförmiger Stoffe in geruchlose Verbindungen übergeführt und dadurch die Geruchseindrücke zerstört werden. Das ist z. B. wahrscheinlich der Fall, wenn man den Geruch des Formaldehyds durch Ammoniak beseitigt. Ich schließe das daraus, daß der Ammoniakgeruch sehr schnell verschwindet, Formaldehyd dagegen einen sehr lange haftenden Geruch besitzt.

In anderen Fällen wird zu einem unliebsamen Geruch einfach ein anderer stärkerer, aufdringlicherer hinzugefügt, und jener dadurch unter die Schwelle des Bewußtseins gebracht, ohne daß von einer eigentlichen Kompensation die Rede sein könnte. Dies ist einer der Hauptgründe für die Verwendung von Parfüms. Auf diese Art mag auch wenigstens teilweise in öffentlichen Bedürfnisanstalten die Geruchsverbesserung durch Creolinpräparate und dergleichen erfolgen. Hierher gehören ferner viele der pharmazeutischen Geruchskorrektionen. So wird das Ricinusöl und der Lebertran durch stark riechende Zusätze genießbarer gemacht. Es ist bemerkenswert, daß hierbei die drei Sinne Geruch, Geschmack und Tastsinn vielfach ineinander greifen: Orangenschalenessenz, die nur auf den Geruchssinn wirkt, dient als Korrigens für das bittere Chinin, das nur auf den Geschmackssinn wirkt; reichlicher Sirupzusatz läßt namentlich das Kind nicht nur unangenehmen (sauern, bitteren) Geschmack, sondern auch widerlichen Geruch vergessen, und das Prickelnde der Brausearzneien ist ein beliebtes Mittel geworden, allerlei unangenehme Gerüche und Geschmäcke zu verdecken. Das Ricinusöl als Typus einer geschmacklosen, widerlich riechenden Arznei, nimmt der Berliner ohne Schwierigkeit in Weißbier; Brauselimonade leistet denselben Dienst als Korri-

gens. Es ist nicht zu verkennen, daß in den meisten dieser Fälle die Ablenkung der Aufmerksamkeit auf den intensiveren und nicht unangenehmen Reiz die Hauptrolle spielt.

Geruchskompensationen im strengen Sinne lehrte Zwaardemaker kennen, indem er mit seinem Doppelolfactometer jedem Nasenloch in der Intensität genau abstufbare Gerüche zuführte. Kautschukgeruch, in richtig abgestufter Intensität ins eine Nasenloch geleitet, läßt den dem anderen Nasenloch zugeführten Geruch von Wachs, Paraffin oder Tolubalsam verschwinden. Bei sehr intensiven Reizen tritt Wettstreit der Gerüche ein (übrigens auch, wenn beide Gerüche in dasselbe Nasenloch geleitet werden), bei schwächeren die völlige Aufhebung der Geruchsempfindung.

Fig. 113.



Doppelriechmesser nach Zwaardemaker.

Von Interesse ist, daß die Gerüche von Ammoniak und Essigsäure sich ebenfalls aufheben können, auch wenn die Vermengung der Dämpfe durch Verwendung des Doppelriechmessers verhindert wird.

Zwaardemaker findet Geruchskompensation nur zwischen solchen Gerüchen möglich, die in seiner Klassifikation den Gerüchen verschiedener Klassen angehören.

Mischgerüche dagegen treten nach Zwaardemaker dann auf (und nur dann), wenn Gerüche aus einer und derselben oder aus nahe verwandten Klassen gleichzeitig einwirken. Ich kann dem nicht beipflichten, wie sich aus dem Folgenden ergeben wird.

Unter einem Mischgeruch verstehe ich [1]) eine Geruchsqualität, die durch gleichzeitige Einwirkung von zwei oder mehreren Gerüchen entsteht, mit keinem derselben der Qualität nach identisch erscheint, vielmehr den Eindruck einer neuen Qualität macht, deren Ursprung aus einer Mischung, mit anderen Worten deren Zusammengesetztheit sich jedoch nicht direkt erkennen läßt.

An und für sich könnte man unter einem Mischgeruch auch eine zusammengesetzte Empfindung verstehen, in welcher die beiden Komponenten gleichzeitig empfunden werden können. Für die Existenz von Mischgerüchen in diesem Sinne kenne ich keine Beweise, wohl aber gibt es Mischgerüche in dem oben definierten Sinne.

Im Gegensatz zu Zwaardemaker finde ich Mischgerüche auch zwischen durchaus unähnlichen Gerüchen erzielbar; ich mischte die Dämpfe vor dem Eintritt in die Nase. Prägnante Mischgerüche ergaben sich z. B. zwischen Vanillin und Brom, Amylacetat und Jod, Terpentin und Xylol usw. Wegen der ungleichen Flüchtigkeit der Riechstoffe, wie auch wegen der ungleichen Ermüdbarkeit des Geruchsorganes für die verschiedenen Reize löst sich allerdings ein solcher Mischgeruch leicht in seine Komponenten auf und es entsteht dann Wettstreit der Gerüche. Theoretisch wichtig ist aber schon das vor-

[1]) Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorgane 15.

übergehende Zustandekommen neuer Geruchsqualitäten durch Mischung (Addition) der Reize.

Bei Mischung von mehr als zwei Komponenten sind die Bedingungen für die Entstehung eines dauerhaften und prägnanten Mischgeruches günstiger als bei Mischung von nur zwei Komponenten. Ist eine der Komponenten dem Beobachter ihrer Qualität nach gut bekannt, so erkennt er unschwer ihr Vorhandensein in der Mischung.

Die gesamten Mischungsverhältnisse im Gebiete des Geruchssinnes zeigen somit eine gewisse Analogie mit den Mischungserscheinungen im Gebiete des Farbensinnes, nur sind die Mischempfindungen labiler; die Empfindungskomponenten fallen leichter auseinander und geben Wettstreit, etwa wie bei der binokularen Farbenmischung.

Bei manchen Riechstoffen ist leicht zu konstatieren, daß sie qualitativ verschieden riechen, je nachdem sie in großer oder kleiner Menge vor die Nase gebracht werden. Schon Fick hat diese Eigenschaft der Buttersäure erwähnt, deren charakteristischer, unangenehmer Geruch nur bei schwacher Einwirkung (kleiner Menge des Riechstoffes oder Verteilung des Dampfes in großer Luftmenge) prägnant und rein hervortritt, während beim Riechen an einer Flasche mit Buttersäure der Säuregeruch, ähnlich dem der Essigsäure, sich stark in den Vordergrund drängt. Ähnliches gilt von der Propionsäure und manchen Alkoholen. Daß die meisten Parfüms in der Flasche ganz anders riechen als wenn sie auf Kleiderstoffen verdampfen, ist bekannt, beruht hier aber großenteils darauf, daß es komplizierte Mischungen sind, deren einzelne Bestandteile ungleich schnell verdunsten.

In anderen Fällen dürfte die Qualitätsänderung bei großer Verdünnung auf Dissoziationsvorgängen beruhen.

XI. Umstimmungs- und Kontrasterscheinungen.

Kontrasterscheinungen sind im Gebiete des Geruchssinnes nicht bekannt, Umstimmungen dagegen sind wohl zu beobachten. Sie äußern sich freilich meist nur in einfach quantitativer Veränderung der Erregbarkeit. Strychnin erhöht bei subkutaner Einspritzung oder Einblasung in die Nase in Pulverform die Erregbarkeit (Fröhlich). Bei mancherlei allgemeinen und lokalen Erkrankungen tritt Herabsetzung oder Erhöhung der Erregbarkeit ein, soweit bekannt und feststellbar am häufigsten für alle Geruchsqualitäten in gleichem Maße. Ab und zu treten aber auch die erwähnten partiellen Anosmien und Hyperosmien auf, auch Parosmien nicht selten. Eine klare Gesetzmäßigkeit ist in diesen Erscheinungen bis jetzt noch nicht zu erkennen.

Von Interesse ist die Wirkung des Santonins bzw. des Natrium santonicum. Bei manchen Menschen, z. B. beim Verfasser, erzeugt dieses Mittel, per os genommen, als erste Erscheinung das Auftreten eines subjektiven, unangenehm brenzlichen Geruchs von sonst unbekannter Qualität. Bei anderen Personen mit ebenfalls gutem Geruchssinn bleibt diese Reizung selbst bei großen Dosen, die schon starke Gesichtssinnesstörungen und Allgemeinerscheinungen machen, gänzlich aus. Bei mir ist eine deutliche Nachwirkung in der Art zu bemerken, daß jener subjektive Geruch teils spontan, teils beim Einwirken anderer Gerüche (Zigarrenrauch) noch tagelang nach einer sehr mäßigen Vergiftung auftritt. Man kann hier geradezu von einer qualitativen Umstimmung reden, da mir z. B. Zigarren nach Santoningenuß wesentlich anders riechen („schmecken") als im normalen Zustande.

XII. Lokalisation der Geruchsempfindungen.

Eine Lokalisation der Geruchsempfindungen als solcher gibt es genau genommen nicht. Ich für meine Person wenigstens vermag meine schwachen Geruchsempfindungen überhaupt gar nicht zu lokalisieren. Sie sind da, ohne daß ich sagen könnte, wo der Ort der Perception ist. Anders liegt die Sache, wenn die Geruchsempfindung von irgend welchen, wenn auch noch so schwachen Empfindungen aus der Empfindungssphäre des Trigeminus begleitet sind (Brennen oder Stechen in der Nase, oder auch nur das leise Gefühl des Vorbeistreichens der Luft an den Prominenzen der Nasenhöhlenwand). Alsdann wird unfehlbar die Geruchsempfindung dahin lokalisiert, wo man jene Trigeminusreize spürt, für die es zwar auch keine sehr scharfe, aber doch eine unzweifelhaft nachweisbare Lokalisation gibt. Die Lokalisation der Gerüche auf dieser Basis ist natürlich eine ganz falsche: man glaubt sie vorn in der Nase in der Gegend des Agger nasi, des Vorderendes der unteren Muschel, oder (bei heftigem Einatmen) hinten im Pharynx wahrzunehmen. Beim Riechen an scharfen Riechstoffen, wie Chloroform, ätherischen Ölen oder gar Senfgeist oder Essigsäure ist dies sehr deutlich zu konstatieren. Bei Substanzen, die weniger reizend auf die respiratorische Nasenschleimhaut wirken, fühlt man sich auch leicht veranlaßt, die Empfindung excentrisch zu projizieren und gewissermaßen vor das Nasenloch zu verlegen.

Eine besonders wichtige und interessante Folge dieses Mangels an Lokalisationsvermögen beim Geruchssinn ist die, daß Gerüche, die von Speisen im Munde ausgehen und durch die Choanen in die Nase dringen, an die Stelle lokalisiert werden, an der die begleitenden Tasteindrücke empfunden werden, also in den Mund oder Schlund. Man mag es noch so genau wissen, daß man den spezifischen Eindruck des Vanillins (in wässeriger Lösung) nur in der Nase, nicht im Munde wahrnimmt: bringt man eine solche Lösung in den Mund und verschluckt sie, so kann man sich nicht von der Vorstellung losmachen, die Perceptionsstelle des Vanille„geschmacks“ sei im Munde oder Schlunde. Aufmerksamkeit ändert hieran nichts. Anders beim umgekehrten Versuch: Einatmen von riechenden Dämpfen, die auch den Geschmackssinn erregen. Atmet man Chloroformdampf ein, so gelingt es bei einiger Aufmerksamkeit und Übung unschwer, zu erkennen, daß die Geschmackskomponente überwiegend (wo nicht ausschließlich) hinten im Pharynx zur Wirkung kommt. Das lokalisierende Vermögen des Geschmackssinnes ist eben, obgleich gegenüber dem Tastsinn recht minderwertig, dem Geruchssinn gegenüber bedeutend im Übergewicht, denn bei diesem ist es gleich Null.

XIII. Geruchswahrnehmungen und Geruchsreflexe.

Geruchs- und Geschmackssinn nehmen dadurch unter den Sinnen eine gewisse Sonderstellung ein, daß sie auch bei den höchsten Wirbeltieren noch hinsichtlich ihrer biologischen Bedeutung für den Organismus viel mehr als die anderen Sinne auf jenem Niveau stehen geblieben sind, auf dem bei den niederen Tieren alle Sinne stehen: sie dienen weit weniger wie der Gehör- und Tastsinn zur Gewinnung bewußter Wahrnehmungen als vielmehr zur Auslösung biologisch wichtiger Triebe. Die Funktion der Riech- und

Schmecknerven nähert sich also mehr derjenigen der rein reflektorisch wirksamen, centripetalen Nerven. Die Bedeutung der Riech- und Schmecknerven beim Essen und Trinken liegt meines Erachtens nicht so sehr darin, daß sie die Qualität des Genossenen beurteilen lassen, als darin, daß ihre Erregung den Trieb zur Nahrungszufuhr erregt und erhält und reflektorisch die Absonderung der Verdauungssäfte auslöst. Pawlow [1]) hat dies für den Hund direkt nachgewiesen; die Magensaftsekretion kann durch die bloße Einwirkung des Geruchs von Fleisch ausgelöst werden. Für den Menschen ist meines Wissens etwas derartiges nicht nachzuweisen, wenngleich die bekannte Redensart, daß einem beim Anblick oder Geruch einer Speise „das Wasser im Munde zusammenlaufe", auf die Annahme einer reflektorischen Speichelsekretion hinweist. Unzweifelhaft kann durch Geruchsreize ein latenter Appetit, d. h. ein Bedürfnis nach Nahrungszufuhr, plötzlich über die Schwelle des Bewußtseins gebracht und sehr merkbar gemacht werden.

Noch viel ausgeprägter ist diese triebauslösende Wirkung der Geruchsreize in der Geschlechtssphäre. Bei sehr vielen Tieren ist der Geruch geradezu das wichtigste, wo nicht das einzig wirksame Moment zur Entfachung des Begattungstriebes. Beim Menschen durchkreuzen sich hier zu vielerlei Wege, auf denen die Natur das Individuum, halb unbewußt, leitet, um den Begattungszweck zu erreichen, und es kommt infolgedessen die Bedeutung des Geruchssinnes für das Sexualleben lange nicht so klar zum Ausdruck wie bei Tieren. An unserer ungenügenden Kenntnis dieses Gebietes trägt neben vielen anderen leicht ersichtlichen Gründen der Umstand die Schuld, daß es sich hier eben nicht sowohl um bewußte Geruchswahrnehmungen handelt als vielmehr um unbewußte, fast reflektorische Tätigkeit des Riechorganes, die nur durch besondere Aufmerksamkeit bewußt werden kann (näheres s. im Abschnitt über Geschlechtstrieb).

Ob beim Menschen wirkliche Reflexe vom Riechnerven aus ausgelöst werden können, erscheint mir nicht ganz sicher. Bei Tieren konnten Aronsohn (l. c.) und Beyer [2]) Beeinflussung des Atmungsrhythmus event. Atmungsstillstand durch Riechreize demonstrieren. Beyer konnte auch den bis dahin fehlenden Beweis liefern, daß der Olfactorius (bei durchschnittenem Trigeminus) die Atmung sowohl im Sinne der Beschleunigung als der Verlangsamung reflektorisch beeinflussen kann (Kaninchen). Beim Menschen sind entsprechende Versuche nicht leicht, weil die schwankende Aufmerksamkeit den Atmungsvorgang modifiziert. Immerhin dürfte eventuell an Schlafenden die Ausführung solcher Versuche möglich sein. Ob die Anschwellung der cavernösen Gewebe in der Nase im Zustande sexueller Erregung auf direktem Reflex von seiten des Olfactorius beruht, muß zum mindesten als zweifelhaft bezeichnet werden.

Daß viele Riechstoffe, die nicht zu den eigentlichen Narcoticis gehören, außer der Beeinflussung der Atmung auch eine Art narkotischer Wirkung (bei Tieren) entfalten können, hat Beyer [3]) gezeigt. Es steht das in gutem Einklang mit der Tatsache, daß auch auf den Menschen gewisse Riechstoffe eine „betäubende" Wirkung ausüben.

---

[1]) Die Arbeit der Verdauungsdrüsen. Wiesbaden 1898. — [2]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abt. 1901. — [3]) Ebenda 1902.

Einzelne Gerüche lösen den Reflex des Würgens oder Brechens aus, wenn sie in wesentlicher Intensität einwirken. Ich könnte das übrigens von keinem der „Odores nauseosi“ Linnés und Zwaardemakers behaupten, wohl aber von anderen, z. B. Schwefelwasserstoff. Bekanntermaßen ist diese Wirkung für manche Menschen beim Chloroform sehr ausgeprägt, für andere beim Äther.

XIV. Geruchssinn und Affekt.

Aus dem oben Gesagten ergiebt sich schon, daß sehr viele Geruchsempfindungen einen affektiven Charakter haben; löst ein Riechreiz den Trieb zur Nahrungsaufnahme oder zum Begattungsakt aus, so verknüpft sich mit der betreffenden Empfindung in der Regel ein Affekt. Die in Aussicht stehende oder beginnende Befriedigung jenes Triebes erzeugt Lust.

Indessen ist die Eigentümlichkeit der Geruchsreize, Lust und Unlust erregen zu können, keineswegs auf solche biologisch leicht verständliche Fälle beschränkt, sondern es gibt zahllose entschieden angenehme Gerüche, denen wir keinen Wert für uns zuschreiben können.

Zahlreich sind auf der anderen Seite auch die unlusterregenden Gerüche, die „Gestänke“. Zwar ist über manche Gerüche die Meinung geteilt, der eine nennt Gestank, was dem andern angenehm riecht. Doch ist das immerhin der seltenere Fall, wenigstens unter Menschen gleicher Rasse und Kulturstufe. Viele Gerüche sind direkt widerlich, ekelerregend. Suchen wir dieser Reaktionsweise unseres Centralnervensystems eine biologische Bedeutung abzugewinnen, so kann diese einmal in einem instinktiven Schutz vor der Aufnahme schädlicher, namentlich in fauliger Zersetzung befindlicher Substanzen gesucht werden. Manche in diese Gruppe gehörige Gerüche flieht jedoch der Mensch, und zwar auch der Wilde, nicht; es werden faulige Stoffe als Leckerbissen verzehrt („haut goût“!). Der Ekel des Menschen vor den Gerüchen tierischer und menschlicher Exkremente hat unzweifelhaft den Wert, daß die Tendenz entsteht, solche Stoffe zu beseitigen, also die für den Organismus förderliche Reinlichkeit zu pflegen. Es wäre eine nicht uninteressante Aufgabe, den Versuch zu einer teleologischen Erklärung der lust- bzw. unlusterregenden Wirkung der verschiedenen Gerüche zu machen. Bis jetzt haben wir kaum die vagsten Anhaltspunkte [1]).

Sehr bekannt ist es, daß die Geruchseindrücke mehr wie andere Sinnesreize imstande sind, die „Stimmung“ des Menschen zu beeinflussen. Ganz unbestimmte, undefinierbare Stimmungen sind es zumeist, die durch einen Geruch momentan hervorgezaubert werden können. Man wird vielleicht nicht fehl gehen, wenn man annimmt, daß hier ein Anklang an die erotische Bedeutung des Geruchssinnes vorliegt. Sehr charakteristisch für die Geruchsempfindung ist übrigens auch ihre assoziative Bedeutung. Ein Geruch kann uns mit zwingender Gewalt in die Vorstellung eines längst verflossenen Ereignisses hineinversetzen; Teergeruch versetzt uns in die Vorstellung eines Seehafens, den wir einst gesehen, der Geruch heißen Maschinenöles reproduziert uns die Erinnerung an eine Dampferfahrt. Das affektive Moment fehlt dabei nicht: Lorbeergeruch kann dem einen die Erinnerung an stolze Freude, dem

[1]) Vergl. übrigens Gießlers oben S. 608 zitierte Arbeit.

anderen an tieftraurige Augenblicke des Lebens wachrufen. Kein anderer Sinn kommt hierin dem Geruchssinn gleich.

Kann man sich Geruchsempfindungen aus der Erinnerung reproduzieren? Manche behaupten es, ohne daß ich mich für überzeugt erklären könnte. Für mich ist es unbedingt nicht der Fall. So leicht es mir ist, das mit einer Geruchsempfindung verbundene Lust- oder Unlustgefühl zu reproduzieren, so unmöglich ist es bezüglich der eigentlichen Geruchsqualität, ganz im Gegensatz etwa zur Reproduktion einer Farbenempfindung.

Das Vorkommen von Geruchsträumen, d. h. Träumen, in denen ein bestimmter Geruch vorkommt, ist geleugnet worden, sehr mit Unrecht; in der Literatur liegen mehrfache positive Angaben vor, und ich erinnere mich ausgesprochener Geruchsträume. Bemerkenswerterweise handelte es sich jedoch häufig um Gerüche, die objektiv vorhanden sein konnten, wobei es als fraglich bezeichnet werden mag, ob in solchem Falle von wirklichen Geruchsträumen zu reden ist. Es scheinen aber auch echte Geruchsträume vorzukommen, bei denen man Gerüche träumt, die objektiv nicht zugegen sein können.

Der Geschmackssinn

von

W. Nagel.

Zusammenfassende Darstellungen, in denen die ältere Literatur gesammelt ist: v. Vintschgau, Geschmackssinn in Hermanns Handbuch der Physiologie 3, Leipzig 1879.
Marchand, Le goût. Bibl. internat. de psychol. expér. Paris 1903.

I. Das Geschmacksorgan; die Geschmacksnerven.

Die der Geschmacksempfindung dienenden Nervenendigungen sind über eine ziemlich große Fläche verbreitet. Die Schleimhautauskleidung der Mundhöhle trägt den wichtigsten Teil des Geschmacksorgans, doch greift dieses auch über die Grenzen der Mundhöhle nach zwei Richtungen über. Die genaueren Angaben über die Verteilung der Geschmacksorgane gehen bei den verschiedenen Autoren nicht unerheblich auseinander; das Folgende läßt sich indessen jetzt als fast allgemein anerkannt hinstellen. Geschmacksempfindlich sind von der Zunge die Spitze, die Ränder und die hinteren Partien des Rückens, nicht aber die vordere Partie des Zungenrückens und die vorderen unteren Regionen der Zunge (Gegend des Frenulum). Geschmacksempfindlich ist ferner der weiche Gaumen, jedoch in sehr wechselnder Ausdehnung; speziell scheint das Schmeckvermögen des Zäpfchens und der Tonsillen nicht konstant zu sein. Kiesow und Hahn[1]) vermissen am Zäpfchen das Schmeckvermögen völlig. Unempfindlich für Geschmacksreize ist im allgemeinen der harte Gaumen, ferner die gesamte Wangen- und Lippenschleimhaut, sowie das Zahnfleisch.

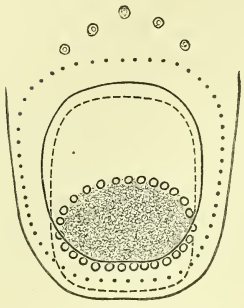
Außerhalb der Mundhöhle findet sich Schmeckvermögen auf der Rückseite des Gaumensegels und im Schlunde in wechselnder Erstreckung. Das Vorkommen von Schmeckvermögen an der Epiglottis und im Innern des Kehlkopfes ist besonders überraschend.

Daß so lange Zeit hindurch keine Einheitlichkeit in den Angaben über die Ausdehnung des Geschmacksorgans erzielt wurde, beruht, wie man nunmehr weiß, nicht oder mindestens nicht ausschließlich auf der Untersuchungsmethode, sondern auf den großen tatsächlichen Unterschieden, die das Geschmacksorgan verschiedener Individuen aufweist.

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 26, 412 f. Kiesow (ebenda 35) fand auch in der Uvula selbst bei Kindern keine Geschmacksknospen.

Hervorzuheben ist vor allem die, wie es scheint, konstante Differenz zwischen dem kindlichen Geschmacksorgan und dem des Erwachsenen. Beim Kinde ist noch Schmeckvermögen des Zungenrückens in seiner ganzen Ausdehnung nachweisbar, beim Erwachsenen in der Regel nicht (Urbantschitsch). Nach einigen Angaben scheint auch die Wangenschleimhaut des Kindes zu schmecken. Die für Geschmack unempfindliche Zone des Zungenrückens ist bei verschiedenen Personen verschieden groß, wie leicht begreiflich, da es sich ja um eine im extrauterinen Leben erworbene Unempfindlichkeit handelt. Genauere Angaben und Abbildungen liegen aus neuerer Zeit vor von Hänig[1]), Schreiber[2]), Shore[3]).

Fig. 114.



Der für Geschmack unempfindliche Teil der Zungenoberfläche, bestimmt bei Reizung mit süß ———, sauer ○○○○○, bitter . . . ., und salzig — — —. Der fein punktierte Bezirk hat gar keine Geschmacksempfindung. (Nach Schreiber.)

Die unempfindliche Zone wird etwas verschieden groß gefunden, je nachdem man mit süßen, sauren, bitteren oder salzigen Stoffen reizt. Am kleinsten ist der für Säure unempfindliche Teil, am größten der zur Perception von Bitterem unfähige. Fig. 114 zeigt die Darstellung dieser Bezirke, die Schreiber gibt. Man sieht, daß der für sauer unempfindliche Teil zugleich für alle anderen Geschmacksarten unempfindlich ist.

Die Verhältnisse sind übrigens in dieser Hinsicht individuell ebenfalls sehr wechselnd, und man wird sich hüten müssen, eine Darstellung wie die Schreibersche als Ausdruck des normalen Verhaltens zu betrachten.

Unter den Erwachsenen findet man nicht selten solche, deren Gaumensegel keine Schmeckfähigkeit hat, auch an der Zungenspitze wird dieser Defekt bei sonst gutem Schmeckvermögen beobachtet. Schmeckvermögen des harten Gaumens ist, wenn überhaupt bei Erwachsenen vorkommend, eine Seltenheit.

Fig. 115.

Zwei isolierte Schmeckzellen und eine Stützzelle aus einer Geschmacksknospe. Dazwischen Nervenendigungen. (Nach Arnstein.)

Ganz seltsam ist die Angabe von Toulouse und Vaschide[4]), daß für den sauren Geschmack die ganze Mundschleimhaut (einschließlich Zahnfleisch, Wangen, harter Gaumen) empfindlich sei, ja sogar die Zähne (!). Diese Autoren haben mit *Acidum aceticum purum* gereizt.

Die Geschmacksknospen. An allen Stellen der Schleimhaut, an welchen Geschmacksempfindlichkeit nachweisbar ist, hat man die von Lovén[5]) und Schwalbe[6]) entdeckten Geschmacksknospen gefunden. Jedes dieser Organe, etwa 80 μ lang und 40 μ dick, besteht aus einer Gruppe von langgestreckten Zellen, zwischen welche sich die letzten feinen Verästelungen der Schmecknerven verfolgen lassen (Fig. 115). Die Mehrzahl der Autoren nimmt

[1]) Zur Psychophysik des Geschmackssinnes. Inaug.-Diss., Leipzig 1901 und Philos. Studien von Wundt **17**, 576. — [2]) Rec. de mémoires sur la philosophie offert à Morochowetzen 1892. Moskau 1893 (zitiert nach Marchand). — [3]) Journ. of Physiol. **13**, 191, 1892. — [4]) Compt. rend. de l'Académie des sciences **130** (1901). — [5]) Arch. f. mikr. Anat. **4** (1867). — [6]) Ebenda **3** (1867).

zwei Arten von Zellen an, Stützzellen und Schmeckzellen. Ob dieser auf Grund der äußeren Gestaltung geschehenen Teilung eine Berechtigung von physiologischen Gesichtspunkten aus zukommt, läßt sich zurzeit nicht beurteilen.

Die „Schmeckzellen" sind von wechselnder Form, doch stets nach dem äußeren Ende der Knospe hin zugespitzt und hier mit einem Stiftchen besetzt. Die spitzen Enden konvergieren gegen die Spitze der Knospe hin. Diese ist vom gewöhnlichen Epithel der Schleimhaut so umgeben und großenteils bedeckt, daß nur die grübchenartige, vertiefte Knospenendigung durch den Porus gustatorius zugänglich bleibt. Von der Schleimhautfläche gesehen erscheint jeder dieser Geschmackspori als eine kleine Lücke zwischen den platten Epithelzellen.

Die Nervenfasern treten marklos zwischen die Zellen der Knospe hinein, von deren Basis aus, und dringen bis hart an den Geschmacksporus vor, ein Umstand, der es etwas zweifelhaft machen könnte, ob die „Schmeckzellen" für die Schmeckfunktion entscheidende Bedeutung haben[1]).

Eine Zeitlang hielt man die Knospen wegen des Porus für hohle Gebilde und nannte sie Schmeckbecher (M. Schultze). Über die Einzelheiten des feineren Baues der Knospen vergleiche die histiologischen Werke.

Das Vorkommen der Geschmacksknospen (Hoffmann[2]) am weichen Gaumen ist nicht unbestritten (Schaffer[3]).

Überraschend war die Auffindung gleicher Knospen an Stellen, denen man zunächst keine Schmeckfunktion zutrauen mochte, nämlich an der Epiglottis (Verson[4]) und im Innern des Kehlkopfes (Davis[5]). Wie bei den Knospen der *Papillae fungiformes* ist bei diesen letztgenannten der Porus in einen kleinen Kanal verlängert, in dem die eigentlichen Knospen ziemlich tief im Epithel sitzen. Das Vorkommen der Knospen an Epiglottis und Kehlkopfschleimhaut gestaltete sich in der Folgezeit zu einem besonders interessanten Beweis für die Schmeckfunktion dieser Gebilde, indem es mehreren Forschern gelang[6]), den experimentellen Beweis zu führen, daß Betupfen mit Chinin, Zucker u. dgl. an jenen Stellen in der Tat Geschmacksempfindung auslöst. Die biologische Bedeutung der Geschmacksorgane an Stellen, die normalerweise nicht von Speisen und Getränken berührt werden, ist unklar. Sehr wahrscheinlich richtig ist die von Zwaardemaker[7]) gelegentlich geäußerte Vermutung, daß die Schmeckbarkeit gewisser Gase und Dämpfe (s. oben S. 611) zum Teil auf jene Organe zurückzuführen ist. Sicher unzutreffend ist dagegen Zwaardemakers Hypothese, daß auch die Riechschleimhaut spezifische Geschmacksorgane enthalte; die von Disse[8]) entdeckten und von Zwaardemaker als Geschmacksknospen bezeichneten Organe in der Regio olfactoria sind unterdessen als drüsige Gebilde erkannt worden.

Die Hauptmasse der Geschmacksknospen befindet sich auf den Papillen der Zunge, und zwar am reichlichsten auf den *Papillae circumvallatae* des hinteren Zungenrückens, deren jede mehrere hundert Knospen auf ihren Seitenwänden trägt, von der eigentlichen Zungenoberfläche also ein Stück weit abgerückt. In ähnlicher Weise vor Berührung geschützt liegen die

---

[1]) Vgl. hierzu Retzius, Biolog. Untersuch. **4**, Stockholm 1892; v. Lenhossek, Anat. Anz. 1893; Arnstein, Arch. f. mikr. Anat. **41** (1893). — [2]) Virchows Archiv **62** (1875). — [3]) Sitzungsber. Akad. Wien, math.-naturw. Kl., **106** (1897). — [4]) Sitzungsber. d. k. Akad. Wien **57** (1868) u. Strickers Handbuch d. Lehre v. d. Geweben, 1871. — [5]) Arch. f. mikr. Anat. **14** (1877). — [6]) Vgl. Gottschau, Würzb. Verhandl. N. F. **15**; Michelson, Virchows Arch. **123** (1891); Kiesow und Hahn, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **23** (1900). — [7]) Ned. Tijdschr. v. Geneesk. **1** (1899) u. Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil. — [8]) Göttinger Nachrichten **2** (1894).

Knospen der *Regio foliata*, seitlich vom Zungengrunde; bei manchen Tieren, namentlich den Nagern, entspricht dieser Region eine deutlich abgegrenzte *Papilla foliata* jederseits, die massenhafte Geschmacksknospen trägt. Auf der Vorderzunge sind die Träger der Knospen die *Papillae fungiformes*. Auf manchen von diesen vermißt man übrigens, wie stets auf den *Papillae filiformes*, die Knospen, und es kann heutzutage keineswegs als sicher hingestellt werden, daß nur da geschmeckt wird, wo Knospen sind.

Daß der Geschmackssinn am besten an den umwallten und blätterförmigen Papillen ausgebildet sei, konstatierte schon 1834 Elsässer[1]), der die betreffenden Spalten auch schon Schmeckspalten nannte. Freie Nervenendigungen im Zungenepithel, die möglicherweise dem Geschmackssinn dienen könnten, beschrieben zuerst Sertoli[2]) und Krohn[3]).

Im Alter gehen nach Hoffmann (l. c.) viele Knospen zugrunde, was die Einschränkung der Schmeckfläche gegenüber den kindlichen Schmeckorganen erklärt.

Nach Durchschneidung des Glossopharyngeus entarten die Geschmacksknospen des betreffenden Gebietes und verschwinden schließlich ganz (v. Vintschgau und Hönigsschmied[4]), von Ranvier[5]) bestätigt).

Die Geschmacksnerven. Die Geschmacksnerven verlaufen in auffallend komplizierten Bahnen. Drei Nerven teilen sich in die Schmeckfunktion, der *Nervus lingualis* (ein Ast der dritten Trigeminusportion), der *Nervus glossopharyngeus* und der *Vagus*. Ersterer versorgt die vordere Partie (etwa $^2/_3$) der Zunge, der *Glossopharyngeus* die hinteren Teile, den Zungengrund und weichen Gaumen mit Geschmacksfasern. Die Geschmacksknospen des Kehldeckels und Kehlkopfes scheinen vom *Vagus* innerviert zu sein.

Die älteren Forscher bis nach Haller nahmen ohne weiteres mit Galenus den Lingualis als einzigen Schmecknerven an, dann wurde eine Zeitlang der Glossopharyngeus als alleiniger Vermittler der Geschmacksempfindungen angesehen, bis sich allmählich die oben erwähnte vermittelnde Ansicht Bahn brach.

Die Tierexperimente haben sich in diesem Punkte als wenig förderlich erwiesen; die Beobachtung von Stannius, Panizza, Valentin u. a., daß Hunde und Katzen nach Durchschneidung der Glossopharyngei keine Geschmacksunterscheidungen mehr machten, können vielleicht so gedeutet werden, daß bei diesen Tieren der Lingualis nicht beim Schmecken beteiligt ist. Die Übertragung auf den Menschen war irrig, wie sich aus den späteren klinischen Beobachtungen ergab.

Die Geschmacksfasern des Lingualis verlaufen teilweise mit dem Trigeminusstamm zum Kopfmark, zum anderen Teil verlassen sie den Lingualis in der *Chorda tympani* und treten aus ihr wiederum teils in den Glossopharyngeus hinüber, teils erreichen sie das Kopfmark in der *Portio intermedia Wrisbergii* des Facialis.

Man wird nicht behaupten dürfen, daß über den Verlauf der Geschmacksbahnen eine einheitliche Auffassung der Autoren herrsche. Während das oben Gesagte wohl die jetzt allgemein geteilte Anschauung wiedergibt, be-

---

[1]) Anmerkung in der von Elsässer gelieferten deutschen Übersetzung von Magendies Lehrbuch der Physiologie **1**, 3. Aufl., Tübingen 1834. — [2]) Gazetta med. veter. **4**, 2, 1873. — [3]) Dissert., Kopenhagen 1875. — [4]) Arch. f. d. ges. Physiol. **14** (1877) u. **23** (1880). — [5]) Traité technique d'histologie. 1. Aufl. S. 949.

stehen bezüglich der Einzelheiten noch mannigfache Differenzen, die im wesentlichen darauf beruhen dürften, daß die Geschmacksfasern ihren Bestimmungsort auf mehreren verschiedenen Wegen erreichen, die sogar wahrscheinlich nicht unerheblichen individuellen Schwankungen unterworfen sind. Wir werden nicht fehl gehen, wenn wir annehmen, daß alle die zarten, zum Teil wenigstens variablen Anastomosen zwischen Glossopharyngeus, Facialis und Trigeminus in der Gegend der Paukenhöhle Geschmacksfasern führen können, aber nicht müssen. Die Erfahrungen der Neuropathologie, die auf den ersten Blick widerspruchsvoll erscheinen, erklären sich ungezwungen nur unter jener Annahme: Benutzung verschiedener Verbindungswege und Vorkommen individueller Schwankungen in der Bedeutung und Mächtigkeit der einzelnen Kommunikationen. Zum gleichen Schlusse sind schon Oppenheim, F. Krause u. a. gekommen.

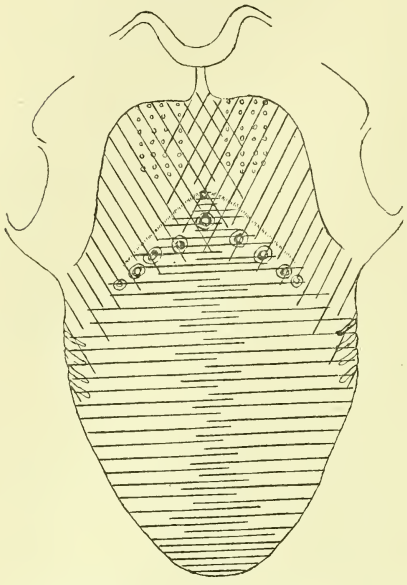
Die Erörterungen über diesen Gegenstand wurden kompliziert einmal durch unzutreffende Verallgemeinerungen einzelner Befunde — was, wie gesagt, wegen der wechselnden Anlage der Bahnen unrichtig erscheint — sodann aber durch die eigentümliche Nachwirkung einer Vorstellung, die aus einer irrigen Auffassung des Gesetzes von den spezifischen Sinnesenergien erwuchs. Man hatte eine Zeitlang unter dem Einfluß der von J. Müller selbst gegebenen Formulierung jenes Gesetzes geglaubt, ein Nerv müsse „der" Geschmacksnerv sein. Wir nehmen jetzt ja an, daß entscheidend für die Qualität der durch einen Nervenreiz erzeugten Empfindung der Ort im Zentralnervensystem (speziell der Hirnrinde) ist, in den die betreffende Nervenbahn einmündet. Wenn also die Autoren sich bemühten, festzustellen, „welchem Nerven die Geschmacksfasern der Chorda zugehören", bzw. wenn gesagt wurde (wie noch in neueren Lehrbüchern, z. B. Landois u. a.), die Geschmacksfasern der Chorda hätten „ihren Ursprung im Glossopharyngeus", so konnte das schließlich doch nur den Sinn haben, daß diese Fasern im Kopfmark mit den Glossopharyngeusfasern zusammentreffen und gemeinsame Verbindungen mit den höheren Zentren besitzen. Unter „Zugehörigkeit" von Nervenfasern zu diesen oder jenen Nerven können wir uns nichts anderes vorstellen als den Besitz gemeinsamer Anschlüsse an die corticalen Sinneszentren; hierdurch ist die spezifische Energie bestimmt, nicht durch den Verlauf in diesem oder jenem Nervenstamm, der aus der Hirnbasis heraustritt. Wir wissen längst, daß die „Hirnnerven", wie sie sich uns beim Verlassen des Gehirns präsentieren, ebensowenig wie die fertigen Spinalnerven etwas funktionell Einheitliches sind. Den älteren Forschern, die mit diesem Gedanken noch nicht vertraut waren, konnte es Schwierigkeiten machen, anzunehmen, daß auch der Trigeminus und der Facialis Geschmacksnerven sein sollten, und es mußte für sie die befriedigendste Lösung sein, wenn sie beweisen zu können glaubten, daß entweder nur der Lingualis oder nur der Glossopharyngeus „der Geschmacksnerv" sei.

Das Unzutreffende dieser antiquierten Vorstellung wird durch nichts besser beleuchtet als durch die neueren Erfahrungen, die F. Krause[1]) über Beeinträchtigung des Geschmackssinns bei intracranieller Durchschneidung des Trigeminus und Exstirpation des Ggl. Gasseri (beim Menschen) gemacht hat. Nach dieser Operation war im Lingualisgebiet das Schmeckvermögen zwar nicht aufgehoben, aber deutlich herabgesetzt. Damit ist der Verlauf von Geschmacksfasern durch den Trigeminusstamm so gut wie erwiesen, da Nebenverletzungen als Ursache dieser Störung nicht wahrscheinlich sind. Niemand wird heutzutage darin eine mit dem Gesetz der spezifischen Energien unvereinbare Tatsache sehen. Darum wäre es sehr zu wünschen, daß nun auch aus den Lehrbüchern und sonstigen Publikationen die zumeist nur im Ausdruck liegenden Reminiscenzen an jene Zeiten verschwinden möchten, in denen der einzelne Nervenstamm seine einheitlich bestimmte Funktion zugeteilt erhalten mußte.

[1]) Münchener mediz. Wochenschr., Jahrg. 42, 1895.

Die anatomischen und physiologischen Forschungen über die Verteilung des Wirkungsgebietes von Lingualis und Glossopharyngeus auf der Zunge stehen insofern im guten Einklang, als sorgfältige Präparationen der Zungennerven, wie sie neuerdings namentlich Zander [1]) beschrieben hat, den beiden Nerven gerade das Verbreitungsgebiet zuweisen, auf welches auch die Beobachtungen über Funktionsstörungen hindeuten; der Lingualis geht zur Schleimhaut der Zungenspitze und des Zungenrandes, nicht aber zum Zungengrund und der *Regio foliata*, wohin anderseits der Glossopharyngeus sich verfolgen läßt. Sogar das Hinübergreifen des jederseitigen Lingualis in seinen Endausbreitungen auf die andere Zungenhälfte, das Zander konstatieren konnte, findet in den experimentellen Befunden sein Gegenstück. Kiesow [2]) fand bei einseitiger Chordalähmung in einem an die Mitte der Zungenspitze angrenzenden Schleimhautstück den Geschmack nicht aufgehoben, sondern nur geschwächt.

Fig. 116.



Die Innervation der Zungenschleimhaut durch Lingualis (horizontal schraffiert), Glossopharyngeus (schräg schraffiert) und Vagus (punktiert) (nach Zander).

Für die Funktion der *Chorda tympani* als Geschmacksnerv der Vorderzunge spricht neben den mannigfachen Beobachtungen über Geschmackslähmung bei Chordazerstörung namentlich auch die Möglichkeit, durch Reizung der in der Paukenhöhle bloßliegenden Chorda Geschmacksempfindungen auszulösen (Duchenne [3]), v. Tröltsch [4]), Urbantschitsch [5]), Politzer [6]), Moos [7]), Kiesow und Nadoleczny [2]) u. a.). Die Reizung kann in der Kontinuität oder am zentralen Stumpf der durchtrennten Chorda erfolgen. Duchenne (l. c.) reizte elektrisch, indem er eine Elektrode in dem mit Wasser gefüllten Gehörgang, die andere am Nacken anbrachte. Stromschleifen kann man hierbei nicht sicher ausschließen, darum bieten die Erfolge mechanischer und chemischer Reizung bei eröffneter Paukenhöhle (Mittelohreiterungen mit Trommelfellverlust) mehr Interesse.

Am häufigsten wird ein saurer oder metallischer Geschmack angegeben, der bei Berührung des Chordastumpfes mit der Sonde auftritt, meist von prickelnden oder stechenden Empfindungen begleitet. In einigen wenigen

---

[1]) Anatom. Anz. **14** (1898), vgl. auch Rautenberg, Beitrag z. Kenntnis d. Empfindungs- u. Geschmacksnerven d. Zunge. Inaug.-Diss. Königsberg 1898. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **23** (1900). — [3]) Arch. génér. de médecine **24** (1850). — [4]) Lehrbuch d. Ohrenheilk., 6. Aufl. — [5]) Arch. f. Ohrenheilk. **19** u. **20** und Beobachtungen über Anomalien des Geschmacks usw. Stuttgart 1876. — [6]) Lehrbuch d. Ohrenheilk. 1893. — [7]) Arch. f. Augen- u. Ohrenheilk. **1**.

Fällen, die Urbantschitsch (l. c.) und Blau [1]) beschrieben haben, traten auch süße und bittere Empfindungen auf, während der salzige Geschmack nicht beobachtet wurde.

Cl. Bernard, Vulpian und Schiff hatten die Bedeutung der Chorda für den Geschmackssinn geleugnet und sie als einen nur zentrifugal leitenden Nerven betrachtet. Schiff ließ die Vorderzunge vom zweiten Trigeminusast innerviert sein.

Da F. Krause [2]) u. a., die nach Totalexstirpationen des Gasserschen Ganglions Geschmacksprüfungen ausgeführt haben (Mac Lane, Tiffany, Blüher, Mitchell, Thomas), in einigen Fällen die vordere Zungenhälfte auf der operierten Seite ganz ohne Geschmackssinn, in anderen Fällen mit herabgesetzter und verlangsamter Schmeckfähigkeit gefunden haben, anderseits in den beobachteten Fällen von Zerstörung der Chorda in der Paukenhöhle das Schmeckvermögen im gleichen Gebiete aufgehoben ist, ergibt sich, daß jedenfalls häufig die Geschmacksfasern der Chorda in den Trigeminus hinübertreten, sei es durch den *N. petrosus superficialis major* und das *Ggl. sphenopalatinum* zum zweiten Ast, oder durch den *N. petrosus superficialis minor*, den *Plexus tympanicus* und das *Ggl. oticum* zum dritten Ast [3]), [4]). Verlauf der Chordaschmeckfasern in der Wrisbergschen Facialiswurzel (Lussana u. a.) oder Übertritt in das *Ggl. petrosum* des Glossopharyngeus muß für diese Fälle ganz ausgeschlossen sein, bzw. nur für einen kleinen Teil der Chordafasern zutreffen.

Eine Regel ohne Ausnahme aber kann in diesem Verhalten nicht gefunden werden; denn wo, wie es Hitzig und einige der oben zitierten Autoren fanden, nach Trigeminusresektion der Geschmack intakt bleibt, wird man nicht umhin können, einen anderen Weg, unter Vermeidung des Trigeminusstammes, anzunehmen, also entweder den erwähnten durch die *Portio intermedia Wrisbergii* oder durch den Glossopharyngeus.

Individuelle Unterschiede scheinen übrigens auch hinsichtlich der taktilen Funktion der Chorda zu bestehen; so berichtet O. Wolf [5]) über einen Fall von Chordalähmung, bei dem außer dem Geschmack auch die Empfindlichkeit für Tast- und Temperaturreize auf der gelähmten Seite aufgehoben war. Kiesow und Nadoleczny (l. c.) dagegen fanden diese Empfindlichkeit unverändert. Carl [6]), der die Geschmacksfunktion auf der Vorderzunge als durch den Glossopharyngeus vermittelt betrachtete, und verschiedene andere Autoren fanden bei Chordareizung taktile Empfindungen in der Zunge. Kälteempfindungen beobachteten in ähnlichen Fällen Urbantschitsch [7]), Toynbee [8]) u. a.

Die Geschmacksfasern für den weichen Gaumen sollen nach Dixon [9]) durch den Wrisbergschen Nerv gehen. Die Umgebung des *Foramen coecum* der Zunge und der Kehldeckel erhalten ihre sensiblen Fasern und vielleicht auch ihre Geschmacksfasern aus dem *Nervus laryngeus superior*, also in letzter Linie aus dem Vagus.

Wegen weiterer Literaturangaben, namentlich aus älterer Zeit, muß auf die sehr eingehende Behandlung dieses Gebietes durch v. Vintschgau verwiesen werden.

---

[1]) Berliner klin. Wochenschr. **45** (1879). — [2]) Münchener med. Wochenschrift. Jahrg. 42, 1895. — [3]) Vgl. hierzu Schlichting, Zeitschr. f. Ohrenheilk. **32** (1894). — [4]) Vgl. Cassirer, Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1899, Suppl. — [5]) O. Wolf, Über Geschmacksstörung bei gewissen Facialislähmungen. Inaug.-Diss. Tübingen 1891. — [6]) Arch. f. Ohrenheilk. **10** (1876). — [7]) Ebenda **19** (1883). — [8]) Die Krankheiten d. Ohres. 1863. — [9]) Journ. of Anat. and Physiol. **33** (1899).

II. Von den Eigenschaften der schmeckbaren Stoffe.

Um als Geschmacksreiz zu wirken, muß ein Stoff in der Mundflüssigkeit mindestens spurenweise löslich sein.

Eine nur scheinbare Ausnahme können Zusammensetzungen verschiedener Metallstücke bilden, an deren Oberfläche elektrische Spannungsdifferenzen bestehen und deren Berührung mit der Zunge somit galvanische Erregungen der Schmeckorgane bewirkt.

Anderseits gibt es Stoffe, die sich in der Mundflüssigkeit lösen oder doch von ihr absorbiert werden und die doch nie Geschmacksempfindung zu bewirken scheinen, so manche Gase, O, H, N; destilliertes Wasser bewirkt bei manchen Personen eine als bitter bezeichnete Geschmacksempfindung, möglicherweise aber nur dadurch, daß schmeckbare Stoffe von der Zunge, den Zähnen usw. aufgeschwemmt werden und nun an anderen Partien zur Wirkung kommen.

Unzweifelhaft können gewisse Dämpfe und Gase „geschmeckt" werden, und nicht nur solche, die auch Geruchsempfindungen auslösen. Kohlensäure z. B. löst, gasförmig auf die Zunge strömend, deutliche Geschmacksempfindung aus. Die Empfindung des Sauren herrscht vor, darunter sind aber auch Anklänge an süßlich und schwache Empfindungen von anderer Art vorhanden, die einigermaßen an das Prickeln der Kohlensäure im Sauerbrunnen erinnern.

Chloroformdampf, der auf die Zunge oder gegen den weichen Gaumen geleitet wird, schmeckt intensiv süß, Aldehyd- und Ätherdampf etwas bitterlich, Essigsäuredampf stark sauer, ununterscheidbar von irgend einer Mineralsäure, sofern der Zutritt zur Nase verhindert wird. Daß dieses „gustatorische Riechen" (wie es nicht ganz zutreffend genannt worden ist) nicht durch die Riechorgane, sondern teils durch die Geschmacksorgane im Munde, teils durch diejenigen auf der Rückseite des Gaumensegels vermittelt wird, wurde schon oben beim Geruchssinn erwähnt (S. 612 f.).

Graham[1]) weist darauf hin, daß alle schmeckbaren Stoffe zu den „cristalloiden" Körpern gehörten, während die „colloiden" nicht schmeckbar seien. Ob dieser Satz in voller Strenge Gültigkeit hat, wird nicht ganz leicht festzustellen sein, weil manche Colloide schwer ganz rein darzustellen sind und zudem bei der Berührung mit dem Mundspeichel Veränderungen und Spaltungen erleiden mögen.

Bemerkenswert ist die auch von Sternberg[2]) erwähnte und anerkannte Angabe, daß Quecksilberchlorid (Sublimat), obgleich es eine für alle Gewebe nichts weniger als indifferente Substanz ist, geschmacklos sein soll.

Über die chemischen oder physikalischen Eigenschaften, auf denen der süße, bittere, saure und salzige Geschmack beruht, wissen wir so gut wie nichts. Höber[3]) und Kiesow[3]) haben eigentlich schon zu viel behauptet, wenn sie sagen, „man weiß, daß die Säuren sauer, daß viele Salze salzig schmecken, man weiß, daß die Alkaloide zumeist bitter, und daß viele Kohlehydrate süß schmecken", denn lange nicht alle Säuren schmecken sauer und nicht alle sauer schmeckenden Stoffe sind im chemischen Sinne Säuren.

Höchst auffallend ist die beträchtliche Verschiedenheit der chemischen Konstitution bei den Stoffen, die süß schmecken. Neben sehr vielen Zucker-

[1]) Zitiert nach Marchand op. cit. S. 62. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 35, 1904. — [3]) Zeitschr. f. physikal. Chemie 27 (1898).

arten und sonstigen organischen Stoffen aus verschiedenen Gruppen (wie Glykoside, Chloroform u. a.) schmecken auch manche anorganische Substanzen süß, wie der Bleizucker, manche Berylliumverbindungen; auch in den Mischgeschmäcken mancher Alkalien und Schwermetallverbindungen ist eine süße Komponente unverkennbar. Sternberg hat in einer ganzen Reihe von Arbeiten[1]) interessante Feststellungen zu dieser Frage geliefert, ohne daß man jedoch behaupten könnte, daß dadurch mehr Klarheit gewonnen wäre.

Von Interesse ist, daß eine reine Zuckerart, die d-Mannose, nach den meisten Angaben[2]) bitter schmeckt. Sternberg[3]) gibt allerdings an, der Geschmack sei zuerst süß und gehe erst allmählich in einen bitteren über, der als Nachgeschmack bestehen bleibt. Bei demselben Autor findet man genaue Angaben über die seltsamen Geschmacksdifferenzen zwischen chemisch-isomeren Körpern, auf die ich hier nicht eingehe, da sie physiologische Bedeutung zunächst noch nicht gewonnen haben. Besonders häufig ist der Umschlag zwischen süß und bitter bei einander verwandten Stoffen; überhaupt ist die Konstitution der bitter schmeckenden Stoffe fast ebenso schwankend wie die der süßen.

Sternberg gegenüber muß übrigens mit Bestimmtheit hervorgehoben werden, daß für solche Geschmacksprüfungen keineswegs, wie er glaubt, die Konzentration gleichgültig ist, ebensowenig wie die gereizte Zungenpartie.

Haycraft[4]) hat die salzig und bitter schmeckenden Metallsalze systematisch zu ordnen gesucht, ohne daß dabei etwas Befriedigendes zutage gekommen wäre. Über den Geschmack von Salzen und Laugen haben Höber und Kiesow (l. c.) Untersuchungen angestellt, auf die in anderem Zusammenhang noch zurückzukommen sein wird.

III. Die Mechanik des Schmeckens.

Abgesehen von dem Spezialfall des Schmeckens von Gasen ist die Bedingung für das Schmecken einer Substanz einfach dadurch gegeben, daß diese die Zunge oder einen anderen, mit Geschmacksorganen ausgerüsteten Teil der Mundschleimhaut berühren müssen, wie dies bei jeder Art von normaler Nahrungsaufnahme geschieht. Die in den Mund gebrachte Speise oder Flüssigkeit berührt für gewöhnlich successive fast die gesamte schmeckende Oberfläche mit Ausnahme der Kehlkopfschleimhaut. Eine vorübergehende Stagnation der mit Schmeckstoffen beladenen Mundflüssigkeit wird leicht zu beiden Seiten des Zungengrundes eintreten, wo eine Häufung von Geschmacksorganen in Gestalt der *Regio* bzw. *Papilla foliata* erkennbar ist.

Es ist nicht ohne Interesse, daß auch bei Insekten, deren Geschmacksorgane ja ganz anders eingerichtet sind wie bei Wirbeltieren, doch in den Fällen, wo eine Art Zunge vorhanden ist, sich eine besondere Häufung der Schmeckpapillen zu beiden Seiten der Zungenwurzel findet, wo sich die Mundflüssigkeit sammeln muß.

Eine weitere Begünstigung für das Stagnieren von Flüssigkeit in unmittelbarer Nähe der Knospen ist durch die Gräben gegeben, welche die

[1]) Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1898 u. 1903; Sitzungsber. Physiol. Ges. Berlin 1898 u. 1902; Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **22** (1899). — [2]) Vgl z. B. von Ekenstein, Rec. trav. chimiques Pays-Bas **14** u. **15** (1896). — [3]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **35** (1904). — [4]) Brain, **10** (1887).

Papillae circumvallatae umgeben, und ebenso durch die Furchen zwischen den Blättern der *Papilla foliata*. Bei den pilzförmigen Papillen der Vorderzunge fehlen solche Vorrichtungen, womit es wahrscheinlich zusammenhängt, daß, wie bekannt, Geschmackseindrücke im hinteren Teile der Mundhöhle viel länger haften als vorn.

Bewegungen der Zunge sind zum Schmecken nicht notwendig, und es kann nicht als erwiesen gelten, daß die Bewegungen der Zunge beim aktiven Schmecken oder „Kosten" die Empfindlichkeit für Geschmacksreize direkt erhöhen. Wie Fick[1]) beobachtete, werden allerdings schmeckbare Flüssigkeiten, die auf den hinteren Teil des Zungenrückens gebracht werden, bei ruhig gehaltener Zunge oft gar nicht oder nur ganz schwach geschmeckt, sehr deutlich dagegen, wenn die Zunge bewegt und an den Gaumen angedrückt wird.

Für Erregbarkeitssteigerung durch den gleichzeitigen mechanischen Reiz spricht, wie Öhrwall[2]) mit Recht hervorhebt, nichts; Öhrwall versuchte auch vergebens, durch mechanische Reize experimentell die Geschmacksempfindlichkeit zu steigern. Die Ficksche Beobachtung erklärt sich aus der durch die Reibung und Bewegung bewirkten Verbreitung der schmeckenden Substanz auf dem Geschmacksorgan und vielleicht auch dadurch, daß das Eindringen der Substanzen in die Gräben der Schmeckpapillen durch Druck von oben erleichtert wird.

Bei festen und halbweichen Substanzen kommt natürlich auch die Einspeichelung bei dem Herumwälzen im Munde in Betracht. Kaubewegungen begünstigen ja die Bildung und Ergießung des Speichels und somit auch indirekt das Schmecken.

Erektion der Geschmackspapillen oder Anschwellung, welche Haller gesehen haben wollte, konnte weder von Bidder[3]), noch von Öhrwall (l. c.) bestätigt werden.

Raspail[4]) hatte behauptet, Eintauchen der Zungenspitze in Zuckerlösung ohne Berührung der Gefäßwände bewirke nur Kälteempfindung, keinen Geschmack; v. Vintschgau, der die Beobachtung anzuerkennen scheint, vermutet, die Berührung mit der Gefäßwand sei nötig, um die Lösung in die Geschmackspori zu pressen.

Öhrwall kann die tatsächliche Beobachtung nicht bestätigen (ich ebenfalls nicht). Die genannten Autoren mögen an der Zungenspitze keinen oder nur unvollkommenen Geschmack gehabt haben.

IV. Die inadäquaten Reize des Geschmacksorganes. Der elektrische Geschmack.

Es ist eine bemerkenswerte Tatsache, daß auf die Geschmacksorgane und im speziellen auf die Endausläufer der Geschmacksnerven in der Zunge, soweit bis jetzt bekannt, mechanische und thermische Reize überhaupt nicht wirken, während die Endigungen der Tastnerven der Zunge, die für die feinsten Berührungsreize empfindlich sind, und ebenso die Wärme- und Kältenerven

[1]) Lehrbuch der Anat. u. Physiol. d. Sinnesorg., 1864, S. 83. — [2]) Skandin. Arch. f. Physiol. 2, 60, 1891. — [3]) Artikel „Schmecken" in Wagners Handwörterbuch der Physiol. 3, 9, 1846. — [4]) Frorieps neue Not. Nr. 98 (V, Nr. 10), 1838.

der Mundschleimhaut allem Anscheine nach in sehr ähnlicher Weise wie die Schmecknerven in der Zunge endigen. Auf die Bedeutung dieser Tatsache für Fragen der allgemeinen Sinnesphysiologie wurde schon oben hingewiesen; sie hat mit der spezifischen Energie der Sinnesorgane nichts zu tun, fällt vielmehr unter das Prinzip der spezifischen Disposition der Sinnesorgane.

Zu erwägen bleibt, ob auch die eigentümlichen Erscheinungen bei elektrischer Reizung des Geschmacksorgans unter diesem Gesichtspunkt zu betrachten sind.

Der galvanische Strom erzeugt beim Durchströmen der Zungengegend Geschmacksempfindungen, die zuerst von Sulzer (1752) beobachtet zu sein scheinen, von Volta (1792) neu entdeckt wurden.

Die Literatur über diesen Gegenstand ist eine sehr umfangreiche. Ältere Arbeiten findet man bei v. Vintschgau in Hermanns Handbuch der Physiologie, Bd. 3, zitiert, neuere bei Hermann und Laserstein[1]). Als wichtigste Arbeiten seien außer den eben erwähnten die folgenden genannt: Ritter[2]), Rosenthal[3]), v. Vintschgau[4]), Shore[5]), Hofmann und Bunzel[6]).

Übereinstimmend wird von fast allen Autoren der Geschmack an der Stelle, wo die Anode der Zunge anliegt, als sauer bezeichnet[7]), während die Bezeichnung des Kathodengeschmacks sehr wechselnd ist (scharf, laugenhaft, bitter usw.). Der elektrische Geschmack, namentlich der saure Geschmack, tritt auch sehr deutlich und in noch größerer Reinheit auf, wenn die Elektroden der Zunge nicht direkt anliegen, sondern irgendwo am Kopfe in solcher Weise angebracht sind, daß noch merkliche Stromschleifen durch die Zunge gehen.

Das Hauptinteresse bei der Untersuchung des elektrischen Geschmacks konzentrierte sich schon sehr früh auf die wohl von A. v. Humboldt[8]) zuerst berührte Frage, ob der elektrische Geschmack von direkter Reizwirkung der Elektrizität oder von chemischen Umsetzungen herrühre, die durch den Strom in den Geweben herbeigeführt werden. Da salzhaltige Flüssigkeiten durch Elektrolyse in der Tat so zerlegt werden, daß an der Anode saure, an der Kathode alkalische Reaktion auftritt, lag es in der Tat sehr nahe, anzunehmen, daß bei der Durchströmung der Zunge im Speichel oder in den Gewebssäften der Zunge selbst sich saure bzw. alkalische Schmeckstoffe bildeten. Gegen diese „elektrolytische Theorie des elektrischen Geschmacks" führte zuerst schon Volta den später vielfach (auch von Rosenthal) bestätigten Versuch ins Feld, bei welchem als Anode eine alkalische Flüssigkeit dient, in die man die Zunge eintaucht, ohne daß dadurch das Auftreten sauren Geschmacks verhindert wird. Rosenthal (l. c.) ließ zwei Personen, die mit je einer Hand einen Pol einer Batterie faßten, sich mit den Zungenspitzen berühren, und obwohl nun die dünne Flüssigkeitsschicht zwischen den beiden

---

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **49**, 1891. — [2]) Gilberts Ann. d. Physik. **7**, 1801 und **19**, 185. — [3]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1866. — [4]) Arch. f. d. ges. Physiol. **20**, 111, 1879. — [5]) Journ. of Physiol. **13** (1892). — [6]) Arch. f. d. ges. Physiol. **66** (1894). — [7]) Ritter gibt an, daß bei sehr starken Strömen die Verteilung der beiden Geschmacksarten sich umkehre. Andere Forscher konnten dies nicht bestätigen. — [8]) Versuche über die gereizten Muskel- u. Nervenfasern usw. I, Posen u. Berlin 1797.

feuchten Zungen nicht gleichzeitig sauer und alkalisch schmecken konnte, hatte die eine Person sauren, die andere alkalischen Geschmack, je nach der Stromesrichtung in ihren Zungen. Rosenthal brachte ferner auf die Zunge schwach blaues Lackmuspapier und setzte auf dieses die Anode: saurer Geschmack wurde wahrgenommen, obgleich das Papier sich nicht rötete.

In Wahrheit beweisen diese Versuche nichts gegen die elektrolytische Theorie. Valentin[1]) hob schon hervor, daß der letzterwähnte Rosenthalsche Versuch nur beweise, daß das Geschmacksorgan empfindlicher reagiert als das Reagenzpapier. Hermann[2]) betonte späterhin mit vollem Rechte, daß es sich keineswegs nur um Elektrolyse des Speichels handeln müsse, sondern daß auch innerhalb des Gewebes selbst, wo Substanzen verschiedener Leitungsfähigkeit aneinander grenzen, Elektrolyse eintreten kann und muß, demnach auch sehr wohl innerhalb der Geschmacksknospen.

Bemerkenswert ist vor allem ja auch die von Valentin in diesem Zusammenhang hervorgehobene Tatsache, daß gerade solche Sensationen bei der Galvanisierung der Zunge auftreten, die den hypothetischen Elektrolyten entsprechen würden. Das ist nun allerdings nur mit Vorbehalt zu behaupten, denn die Empfindung am negativen Pol hat einen recht komplizierten, schwer definierbaren Charakter. Unzweifelhaft werden an der Kathode neben Geschmackseindrücken stechende und brennende Empfindungen ausgelöst, deren schwierige Abgrenzung gegenüber dem Geschmack sich hier wieder einmal eklatant zeigt. Mir erscheint die Kathodenreizung an der Zungenspitze sehr ähnlich der Reizwirkung bei punktförmiger Betupfung mit einer etwas starken Lauge. Der charakteristische laugige Geschmack im letzteren Falle tritt offenbar erst bei Diffusion und Abschwächung des Reizes auf. Bei der galvanischen Reizung fällt dieses Moment natürlich weg, und so könnte man nach der Qualität der Empfindung bei den beiden Reizungsarten sehr wohl die elektrolytische Theorie befriedigend finden. Es muß aber bedacht werden, daß die Empfindung bei der Laugenreizung, solange sie punktförmig ist, sehr wenig charakteristisch gerade für das Alkali ist und alle möglichen anderen Arten von „scharfen“ Stoffen eine sehr ähnliche Empfindung erzeugen. Hermann und Laserstein nennen den Kathodengeschmack „deutlich laugenhaft, etwas bitterlich“, Hofmann und Bunzel vergleichen ihn zwar auch mit demjenigen der bitterlich schmeckenden, verdünnten Kalilaugen, finden aber hier wie dort das eigentlich Laugenhafte nicht so deutlich ausgeprägt wie beispielsweise bei Sodalösung. Shore hinwiederum findet in der 10proz. Sodalösung den passenden Vergleich.

Von Hofmanns und Bunzels Untersuchngen möge hier noch erwähnt werden, daß die Autoren am Zungengrunde die bittere Empfindung (an der Kathode) reiner fanden als an der Spitze, und zwar auch bei großer Stromdichte, die an der Zungenspitze stechende Empfindungen bewirkt. Der Anodengeschmack bekommt am Zungengrunde metallischen Beigeschmack, bei stärkerer Reizung mit Ekel verknüpft.

Seit langem weiß man, daß der galvanische Strom auf das Geschmacksorgan als Dauerreiz wirkt und Stromschwankungen die Empfindung nur

---

[1]) Versuch einer physiol. Pathol. der Nerven, 1864. — [2]) Grundriß der Physiol., 4. Aufl. 1872, S. 337.

unerheblich, wenn überhaupt, verstärken; bei der Stromöffnung hatte Ritter Umkehr des Geschmacks gefunden. Die Richtigkeit dieser Beobachtung wurde von Rosenthal bestritten, von v. Vintschgau mit gewissen Einschränkungen wieder bestätigt. Für Hofmann und Bunzel ist, wie auch für mich, der Kathodenöffnungsgeschmack deutlich sauer, dabei stärker als der Kathodenschließungsgeschmack (Shore). Er tritt schon bei Strömen auf, die bei der Schließung überhaupt keine Empfindung erzeugen (von v. Vintschgau schon gelegentlich beobachtet).

Am Zungengrunde finden Hofmann und Bunzel im KaOe-Geschmack eine deutliche Süßkomponente. Süßer Geschmack tritt an dieser Stelle auch als Nachgeschmack nach Alkali-Reizung auf. Auch Öhrwall[1]) fand an der Kathode süßen und bitteren Geschmack. Die für Geschmack unempfindlichen Partien ergeben auch keinen elektrischen Geschmack. Wohl aber tritt, wie Hermann fand (l. c.), bei Aufsetzung der Kathode auf die unempfindliche Region an den Rändern der Zunge der saure „Gegengeschmack" auf, infolge der Bildung sekundärer Elektroden. Bitterer oder laugenhafter Gegengeschmack bei Anodenapplikation existiert nicht. Cocainisierung der Zungenschleimhaut, die den Geschmack (bei Hermann) völlig aufhebt, vernichtet auch den elektrischen Geschmack. Hofmann und Bunzel bestätigten dieses, fanden aber außerdem ein weiteres Stadium der Cocainwirkung, in welchem nur der bittere Geschmack aufgehoben ist; in diesem Stadium erzeugte ein Strom, der deutlichen KaOe-Geschmack machte, keine Spur einer KaS-Empfindung. Die Cocainversuche ergaben im KaS-Geschmack hiernach das Vorhandensein einer bitteren Komponente, entsprechende Versuche mit Gymnema-Anästhesie eine süße Komponente im KaOe-Geschmack.

Die Folgerungen für die Theorie des elektrischen Geschmacks, die aus den erwähnten Tatsachen gezogen werden können, sind bis jetzt noch unbefriedigend. Hermann hat sich auf Grund der Lasersteinschen Versuche für die elektrolytische Theorie entschieden, muß also den KaOe-Geschmack als eine Art Kontrasterscheinung auffassen, Hofmann und Bunzel finden in dem Vorhandensein eines KaOe-Geschmacks bei fehlendem KaS-Geschmack ein starkes Bedenken und wollen neben der adäquaten Erregung durch Elektrolyte die direkte Erregung der Nervenfasern durch den Strom zur Erklärung der komplizierten Erscheinungen heranziehen, betonen übrigens, meines Erachtens sehr mit Recht, daß die vorliegenden Daten eine völlig befriedigende Erklärung noch nicht ergeben. Sicher ist, daß man in dem Nachweis der Bitterkomponente im KaS-Geschmack ein Argument gegen die elektrolytische Theorie nicht finden kann, da reines Alkali unter Umständen auch nur rein bitteren Geschmack erzeugt. Ebensowenig kann das Auffinden einer Süßkomponente im KaOe-Geschmack für direkte Erregung von „Süßfasern" gedeutet werden. Auch Alkaligeschmack enthält unter Umständen eine Süßkomponente, ich erinnere an die Kiesowsche Beobachtung[2]) des laugenhaften Mischgeschmacks bei Mischung von Süß und Salzig; ob der süße Nachgeschmack nach Kalilauge eine Kontrasterschei-

[1]) Skandin. Arch. f. Physiol. 2, 63, 1891. — [2]) Philos. Studien von W. Wundt, 12 (196).

nung ist, muß zum mindesten zweifelhaft genannt werden, wahrscheinlicher ist es, daß in der Nachwirkung eine Komponente zum Vorschein kommt, die vorher durch die bittere übertönt war (bitterer Geschmack bleibt als lange haftender Nachgeschmack nur bei gewissen Stoffen, nicht nach Reizung mit Bittersalz!).

Die Angaben von Öhrwall[1]) über Reizungen von einzelnen Papillen sind zu unbestimmt, um irgend welche Schlüsse für die hier interessierenden Fragen zu gestatten; auch Kiesow[2]) scheint bei seinen Reizungen einzelner Papillen nichts Klares gefunden zu haben.

Jedenfalls liegt in den bisher erwähnten Beobachtungen nichts, was die elektrolytische Theorie ausschlösse. Direkt für diese sprechen Versuche, die v. Zeynek[3]) neuerdings angestellt hat; sie ergaben, daß der elektrische Geschmack sich mit zunehmender Stromspannung in der Art ändert, wie es bei Voraussetzung elektrolytischer Wirkung erwartet werden konnte.

Lag die Kathode an der Schmeckfläche, so entstand bei der Spannung 0,7 Volt eine unbestimmte, bei 1,5 Volt eine „herbe, wenig alkalische", bei 2 Volt eine deutlich laugenhafte Empfindung. Etwa bei 1,08 Volt lag der Zersetzungspunkt der Hydroxylionen, bei 1,45 derjenige der Kaliumionen. Analog waren die Verhältnisse bei Anodenreizung.

Erwiesen scheint mir, daß die Nervenfasern in der Zunge nicht auf jeden wirksamen Reiz mit einer spezifischen Geschmacksqualität reagieren, sondern die Qualität, in der sie reagieren, durch die Beschaffenheit des Endorgans (der Geschmacksknospen) und in gewissem Maße natürlich auch des Reizes bestimmt ist. Wahrscheinlich funktionieren die „Schmeckzellen" als Überträger für den adäquaten wie auch für den inadäquaten (elektrischen) Reiz, indem letzterer durch elektrolytische Vorgänge in den adäquaten übergeführt wird. Weiter unten (S. 641 f) komme ich in anderem Zusammenhange auf die spezifische Energie und Disposition der Geschmacksorgane zurück.

Mechanische Reize scheinen die Geschmacksorgane nicht erregen zu können. Nach verschiedenen älteren Angaben (Valentin, Wagner, v. Vintschgau) soll allerdings Druck auf die Zunge oder leises Klopfen auf die Zungenspitze (Baly[4]) Geschmacksempfindungen auslösen. Ob es sich hier um wirkliche mechanische Reizung der Geschmacksnerven handelt, ist mir sehr zweifelhaft. Ich habe übrigens, wenn ich die Zunge aus dem Munde herausgestreckt halte, fast regelmäßig verschiedenartige Geschmackssensationen. Kiesow[5]) fand bei mechanischer Reizung einzelner Papillen mit Holzstäbchen keine Wirkung auf den Geschmackssinn.

V. Gustometrie und Saporimetrie.

Die Messung der Empfindlichkeit des Geschmacksorgans für seinen adäquaten Reiz möge in Analogie zur Bezeichnung Olfactometrie als Gustometrie bezeichnet werden, die vergleichende Messung der Reizwirkung verschiedener Schmeckstoffe als Saporimetrie (entsprechend der Odorimetrie).

---

[1]) Skandin. Arch. f. Physiol. 2 (1891). — [2]) Philos. Studien von W. Wundt **14** (1898). — [3]) Zentralbl. f. Physiol. **13** (1898). — [4]) Übersetzung von Müllers Physiol. Anm. S. 1062 (zitiert nach v. Vintschgau). — [5]) Philos. Stud. von W. Wundt **14**, 614, 1898.

Bei der Gustometrie wird die Reizintensität des verwendeten Schmeckstoffes als bekannt und konstant vorausgesetzt und die Empfindlichkeit des Sinnesorgans für denselben geprüft; bei der Saporimetrie nehmen wir die Empfindlichkeit des normalen Geschmacksorgans als etwas fest Gegebenes und prüfen vergleichend die Reizwirkung verschiedener Substanzen. Die Prüfung geschieht hier wie bei anderen Sinnesorganen nach dem Prinzip der Schwellenbestimmung, d. h. wir bestimmen den eben merklichen Reiz, in dem speziellen Fall des Geschmackes die eben merkliche Konzentration eines Stoffes in einem bestimmten Flüssigkeitsquantum, das in den Mund gebracht wird, oder die absolute Gewichtsmenge einer Substanz, die mit dem Geschmacksorgan in Berührung gebracht werden muß, damit Geschmacksempfindung zustande kommt. Rationelle Saporimetrie sowohl wie Gustometrie hat zur Voraussetzung genaue Kenntnis der Wirkungsbedingungen des adäquaten Geschmacksreizes.

Abgesehen von der Menge der reizenden Substanz bestimmt den Reizerfolg: 1. die Größe der gereizten Schleimhautfläche, 2. die Dauer der Einwirkung des Reizes, 3. die Temperatur der Schleimhaut und der reizenden Substanz, 4. der Erregbarkeitszustand des Sinnesorgans bzw. des gesamten Nervensystems.

Die Angaben über die zur Erregung des Geschmackssinnes nötigen Substanzmengen und Konzentrationen sind sehr schwankend, hauptsächlich wohl weil die verschiedenen Untersucher verschiedene Prüfungsmethoden anwandten, außerdem aber wahrscheinlich wegen der erheblichen individuellen Differenzen der Erregbarkeit. Die älteren Angaben findet man bei v. Vintschgau zitiert, die neueren recht vollständig bei Zwaardemaker[1]) und Marchand[2]).

Die neueren Untersuchungen bestätigen eigentlich nur, was Valentin[3]) i. J. 1848 schon gefunden hatte. Ich gebe einige Zahlen nach Valentin (den Gehalt in Prozent umgerechnet).

	Gehalt Proz.	Gesamtmenge d. geschmeckten Flüssigkeit ccm	Absoluter Gehalt der Lösung g	Bemerkungen
Zucker	1,2	20	0,240	eben erkennbar
Kochsalz	0,4	1,5	0,007	deutlich, aber schwach
Schwefelsäure . .	0,2	12	0,027	äußerst schwach
(wasserfrei) . .	0,001	—	—	eben erkennbar, nicht deutlich
	0,0001	—	—	
Chininsulfat . . .	0,003	—	—	deutlich
	0,0001	—	—	höchstens eine Spur

Man erhält also verschiedene Schwellen, wenn man eine bestimmte Substanzmenge in verschiedenen Mengen Wasser löst. Eine kleine Menge

[1]) Zusammenfassendes Referat in Ergebn. d. Physiol. 2, 2, 1903. — [2]) Le goût. Paris 1903. — [3]) Lehrbuch d. Physiol. d. Menschen 2, (2), 301, 1848.

konzentrierter Lösung ergibt niedrigere Schwellenwerte als Lösung derselben Menge in einer größeren Portion Wasser. Demgemäß schwanken auch die Angaben der neueren Autoren je nach der Menge des Lösungsmittels, die sie verwandten. Ich gebe noch einige Zahlen über die absoluten Mengen der Schmeckstoffe, die nach neueren Autoren eben zur Erregung der Geschmacksempfindung hinreichen.

Zucker: 3 mg (Venables[1]), 58 (Heymans[2]).

Kochsalz: 1 mg (Venables[1]), 3 (Höber und Kiesow[3]), 25 (Heymans[2]), 36 (Kahlenberg[4]).

Schwefelsäure: 0,4 mg (Öhrwall, l. c.).

Chinin. hydrochlor.: 0,04 (Heymans[2]).

Bei diesen Schwankungen haben die absoluten Zahlen begreiflicherweise geringen Wert. Die Autoren, die hohen Schwellenwert angeben, haben meistens größere Flüssigkeitsmengen angewandt. Besonders hochgradig ist die Empfindlichkeit für den bitteren Geschmack des Strychninsulfats. Lombroso und Ottolenghi[5]) fanden, wenn sie 0,5 ccm einer 0,001 proz. Lösung anwandten, noch Geschmacksempfindung. Das wäre 0,005 mg als wirksame Menge.

Besonders eingehende Untersuchungen hat Camerer[6]) über die Grenzen der Schmeckbarkeit des Chlornatriums unter verschiedenen Bedingungen angestellt; er reizte auch schon einzelne Papillen und fand eine Lösung mit 0,0062 g NaCl wirksam, mit 0,0021 schon unwirksam. Die minimale Menge ClNa, die bei Betupfen einer pilzförmigen Papille mit einem Kristall ausreicht, um die Empfindung des Salzigen hervorzurufen, schätzt Camerer auf weniger als 0,0024 mg.

Der Einfluß der Größe der gereizten Zungenoberfläche ergibt sich ebenfalls aus Versuchen von Camerer. Die Zahl der richtigen Urteile beim Vergleich einer salzhaltigen und einer salzfreien Flüssigkeit nahm merklich zu, je mehr Papillen gereizt wurden.

Bezüglich des Einflusses der Temperatur der Lösungen auf die Feinheit des Geschmacks hatte Camerer gefunden, daß ein Optimum bei Temperaturen zwischen 10 und 20° zu finden sei. Kiesow[7]) findet dagegen, daß bei allen Temperaturen, bei denen kein Wärme- oder Kälteschmerz auftritt, die Empfindlichkeit dieselbe bleibt; andererseits bestätigte Kiesow, wie auch schon früher Guyot[8]), den alten E. H. Weberschen Versuch[9]), der beweist, daß nach starker Abkühlung oder Erwärmung die Zunge zunächst unempfindlich für Geschmackseindrücke ist. Nach Behandlung mit Eis oder Wasser von 50 bis 51° ist für etwa 10 Sekunden die Zunge selbst für starke Geschmacksreize unempfindlich. Nur der saure Geschmack wird durch Wärme gar nicht, durch Kälte fast gar nicht beeinträchtigt. Kochsalz schmeckt bei dieser künstlich erzeugten Geschmacksstörung zuerst sauer, erst allmählich kommt der spezifische Geschmack zum Vorschein.

---

[1]) Chem. News, 1887. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **21** (1899). — [3]) Zeitschr. f. physik. Chem. **27** (1898). — [4]) Bull. of the Univ. of Wisconsin, 1898. — [5]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **2** (1891). — [6]) Anz. f. d. ges. Physiol. **2** u. Zeitschr. f. Biol. **6** (1870). — [7]) Philosoph. Studien v. W. Wundt **12** (1896). — [8]) Compt. rend. **42** (1856). — [9]) J. Müllers Arch. f. Anat., Physiol. u. wissensch. Med. 1849.

Eine Trennung der generellen Schwelle (s. o. **3**, 19) von der spezifischen Schwelle, bei welcher erst die Qualität des Geschmacks erkannt wird, ist entschieden zu konstatieren, wenn auch die beiden Schwellen in der Regel nicht weit auseinanderliegen; immerhin ist die Erscheinung wesentlich deutlicher als beim Geruchssinn, wo sie nur eben angedeutet ist.

Mit steigender Reizintensität ändern sich alle Geschmacksarten, was zum Teil darauf beruhen wird, daß sich die Reizwirkung auf Tast- und Temperatursinn allmählich einstellt, die nahe der spezifischen Geschmacksschwelle noch fehlt.

Genügende Grundlagen für die Aufstellung einer Norm der Geschmacksschärfe und für gustometrische Untersuchungen an Kranken scheinen mir in den bisher veröffentlichten Versuchen nicht gegeben zu sein. Die Beobachtungen an pathologischen Fällen können daher bis jetzt nur eine geringe Genauigkeit erreichen. Größere Untersuchungsreihen an zahlreichen gesunden Personen wären zur Ausbildung einer gustometrischen Methodik sehr zu wünschen. Toulouse und Vaschide[1]) haben eine Boîte gustatométrique, d. h. eine Kollektion von Schmeckstoffen, angegeben, mit der aber noch nichts für unsere Zwecke Brauchbares erreicht worden ist.

Zwaardemaker[2]) hat versucht, genau dosierte Geschmacksreize bequem zu applizieren, indem er Keile von Holundermark oder später von Gelatine (durch Formalindämpfe unlöslich gemacht) mit Schmeckstoffen tränkte und mit Doppelmesser verschieden große Scheiben ausschnitt, die im Munde dann ihren Schmeckstoff abgeben sollten; doch eignet sich die Methode nicht für lokalisierte Reizung.

Neuerdings hat man die „Schmeckkraft" verschiedener Substanzen von ähnlicher oder gleicher Geschmacksqualität verglichen, indem man von ihnen äquimolekulare Lösungen herstellte und deren Geschmacksintensität verglich.

Richet und Gley[3]) haben für die Halogenverbindungen der Metalle Lithium, Kalium, Natrium, Rubidium die Schmeckbarkeitsschwellen unter gleichen Bedingungen festgestellt und gefunden, daß die Reizwirkung dieser Salze auf den Geschmack ungefähr dem Molekulargewicht proportional ist; gleiche Gewichtsmengen wirken sehr verschieden. Ähnliche Versuche hat, anschließend an Beobachtungen über die chemische Reizung der sensiblen und motorischen Nerven, Grützner[4]) angestellt, der zunächst äquiprozentuale Lösungen der Haloidsalze verglich und hierbei das NaCl sehr viel wirksamer fand als NaBr und NaJ mit der kleineren Zahl von Molekeln. Äquimolekulare Lösungen von nahe verwandten Stoffen aber schmecken nahezu gleichartig, wenn auch nicht gleich. Bei stärkeren Verdünnungen bleibt das NaCl stets im Übergewicht. Chlorkalium, Chlorrubidium und Chlorcäsium zeigen keinen erheblichen Unterschied. Äquimolekulare Lösungen von Mineralsäuren wirken deutlich verschieden, am sauersten ist die Schwefelsäure, dann folgen Salz- und Salpetersäure, zuletzt die Phosphorsäure. Mit Säuren hatte übrigens Corin[5]) schon in ähnlicher Weise

---

[1]) Compt. rend. **130** (1901). Vgl. auch Marchand, Le goût. — [2]) Ned. Otolaryng. Verein 1897. — [3]) Compt. rend. Soc. de biol. 1885, p. 742. — [4]) Arch. f. d. ges. Physiol. **53** (1892) und **58** (1894). — [5]) Arch. d. biolog. **8** (1888).

experimentiert und dabei gefunden, daß bei dem gleichen Gehalt an Normalsäure (äquimolekulare Lösungen) die Säuren mit niedrigem Molekulargewicht am sauersten schmeckten.

Seitdem man angefangen hat, die Dissoziation der Molekeln in den Lösungen zu berücksichtigen, sind auch verschiedene saporimetrische Untersuchungen unter diesem Gesichtspunkte angestellt worden (Richards[1]), Kahlenberg[2]), Höber und Kiesow[3]), Kastle[4]). Bei den Säuren sollen die H-Ionen, bei den Alkalien die Hydroxylionen für den Geschmack verantwortlich sein. Bei den Haloiden soll nach Höber und Kiesow die Konzentration der Anionen für die Schmeckbarkeitsgrenze maßgebend sein, ebenso bei Alkalilösungen. Die Geschmacksgrenze liegt für die Kalium-, Natrium- und Magnesiumsalze bei 0,020 bis 0,025 g-Ion pro Kilogramm Lösung. Für die Beryllsalze fanden die genannten Autoren dagegen die Konzentration der Kationen entscheidend für das Auftreten des süßen Geschmacks.

VI. Anomalien des Geschmackssinnes. Toxische Einflüsse.

Angeborenes Fehlen des Geschmackssinnes ist meines Wissens nicht beobachtet; auch kenne ich keine sicheren Fälle von angeborenen partiellen Defekten des Geschmackssinnes, bei denen das System der Geschmacksempfindungen vereinfacht sein müßte. Unscharfe Trennung der Begriffe „salzig“ und „sauer“ ist nicht selten, scheint aber mehr auf einem Sprachgebrauch zu beruhen als auf Sinnesstörung. Eine gewisse, eben angedeutete Ähnlichkeit zwischen den Empfindungen sauer und salzig bemerke übrigens auch ich.

Pathologisch kommt Fehlen des Geschmackssinnes (Ageusie) häufig vor, auf Grund peripherer oder zentraler Erkrankungen, je nach deren Sitz einseitig oder doppelseitig, im ganzen Munde oder nur in einem Teil der sonst Geschmacksorgane tragenden Schleimhäute. Die Lähmung kann das Empfindungsvermögen für die verschiedenen Qualitäten in ungleichem Maße betreffen.

Parageusie, Geschmacksempfindungen, die der Qualität des applizierten Reizes nicht entsprechen, treten besonders häufig bei zentralen Erkrankungen auf, als Einleitung zum Eintritt einer mehr oder weniger vollständigen Geschmackslähmung. In einem mir bekannten Falle ging der (einseitigen) Geschmackslähmung ein Zustand voraus, in dem auf der kranken Seite alles salzig schmeckte.

Das Vorkommen wirklicher Geschmackshalluzinationen bei Geistesgesunden scheint nicht nachweisbar zu sein. Bei Hysterischen ist partielle oder totale Aufhebung des Geschmacks sehr häufig[5]).

Experimentell läßt sich das System der Geschmacksempfindungen durch verschiedene toxische Einflüsse reduzieren, so vor allem durch die Gymnemasäure, einen Stoff, der in den Blättern der indischen Asclepiadee Gymnema silvestre enthalten ist. Kaut man diese Blätter, so wird, wie Edgeworth

[1]) Americ. chem. Journ. **20** (1898) und Journ. Phys. Chem. **4** (1900) nach Sternberg zit. — [2]) Bull. Univers. Wisconsin **2** (1898). — [3]) Zeitschr. f. physik. Chem. **27** (1898). — [4]) Americ. chem. Journ. **20** (1898). — [5]) Vgl. Binswanger, Die Hysterie. Wien 1903.

fand und Hooper[1]) zuerst genauer feststellte, der süße und der bittere Geschmack völlig aufgehoben. Shore[2]) erzeugte die gleiche Wirkung durch Bepinselung der Zunge mit 2 proz. Lösung von Natrium gymnemicum. Die Wirkung dauert stundenlang; Zucker und Chinin erscheinen völlig geschmacklos, saure und salzige Geschmäcke werden unverändert wahrgenommen.

Cocain[3]) und Eucain B[4]) heben zwar bei intensiver Einwirkung den Geschmack in allen Qualitäten gänzlich auf (v. Anrep[5]), bei schwächerer Einwirkung zeigen indessen auch sie eine elektive Wirkung, indem sie den bitteren Geschmack zuerst und am stärksten beeinträchtigen.

Nach Lewin[6]) enthalten die Blätter von Eriodictyon glutinosum in der Eriodictyoninsäure ebenfalls einen Stoff, der die Bitterempfindung aufhebt.

VII. Die Qualitäten der Geschmacksempfindung.

Von Geschmacksqualitäten lassen sich vier mit Sicherheit unterscheiden: süß, sauer, bitter und salzig. Das Ölige, Aromatische, Brennende, Zusammenziehende und ähnliche Empfindungsqualitäten gehören anderen Sinnen zu, teils dem Geruchssinn, teils dem Tast- und dem Temperatursinn. Unentschieden ist es zurzeit noch, ob das Laugenhafte (Alkalische) und das Metallische besondere Geschmacksqualitäten darstellen. Beide sind allerdings von den oben genannten Qualitäten leicht zu unterscheiden und beruhen sicher wenigstens teilweise auf Reizung des Geschmackssinnes. Unsicher bleibt aber zunächst, ob das Metallische und Laugige nicht Mischempfindungen sind. Die Beobachtung Kiesows[7]), daß Mischungen von Süß und Salzig in geringer Intensität die Empfindung des „Faden" geben, ähnlich einer stark verdünnten Lauge, beweist weder etwas für noch gegen die Existenz des Laugenhaften als einer besonderen Geschmacksqualität.

Die bis jetzt ermittelten Tatsachen scheinen mir ein sicheres Urteil über die Frage, ob außer den bekannten vier Geschmacksqualitäten noch weitere anzunehmen sind, nicht zu ermöglichen. Unzweifelhaft sind in den Empfindungen des Metallischen und des Laugenhaften einzelne der sicher festgestellten Qualitäten enthalten, im Metallischen das Saure und Süße, im Laugenhaften das Bittere und vielleicht ebenfalls das Süße; in beiden Fällen mischen sich Sensationen bei, die dem eigentlichen Geschmackssinn nicht zugehören, z. B. dem metallischen Geschmack das Zusammenziehende, dem Laugenhaften das Brennende oder das Schlüpfrige, oder beides zusammen. Manche Alkalien, wie reine, stark verdünnte Kalilauge, erzeugen auf der unbewegten Zunge wenigstens vorübergehend einen rein bitteren Geschmack. Zu beachten ist, daß sowohl Alkalien wie metallische Substanzen auch charakteristische Geruchsempfindungen auslösen, allerdings, wie ich glaube, nicht die reinen Alkalien und Schwermetallsalze. Sicherlich gibt es einen „metallischen Geruch", der allerdings keine einheitliche Qualität darstellt, sondern z. B. für Kupfer- und Eisenverbindungen deutlich verschieden ist. Inwieweit solche Geruchseindrücke und die gleichfalls recht wechselnden Tastempfindungen für die Eigenartigkeit der Empfindungen des Metallischen und Laugenhaften bestimmend sind, muß weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

---

[1]) Nature **35**, 565, 1887. — [2]) Journ. of Physiol. **13** (1892). — [3]) Knapp, Arch. f. Augenheilk. **15** (1885) und Deutsche med. Wochenschr. 1886, ferner Adducco und Mosso, Giorn. R. Accad. med. 1886. — [4]) Fontana, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **28** (1902). — [5]) Arch. f. d. ges. Physiol. **21** (1880). — [6]) Berliner klin. Wochenschr. 1894, Nr. 28. — [7]) Philosoph. Studien von W. Wundt.

Die älteren Forscher rechneten das Ekelhafte meistens als besondere Geschmacksqualität. Dieser Begriff ist allerdings recht unbestimmt; meistens wird jetzt das Wort ekelhaft in einem übertragenen Sinne verwandt, in welchem es zum Geschmack entschieden keine Beziehung mehr hat. Richtig ist, daß mechanische und auch starke elektrische Reizung des Zungengrundes eine eigentümliche Wirkung hat. Neben der Neigung zu Würgbewegungen treten ungewöhnliche, unangenehme Empfindungen auf. Ich glaube, man sollte eher von einem Ekelgefühl als von einer Ekelempfindung reden.

Die Teilung der Geschmacksarten in „reine" und solche, denen Empfindungen aus dem Gebiete anderer Sinne beigefügt sind, entbehrt jeder Bedeutung, ebenso wie die entsprechende Einteilung der Gerüche. Keinerlei Geschmacksart hat stets etwas Scharfes oder Brennendes an sich; darum erscheint es nicht hinreichend motiviert, wenn manche Autoren (Zenneck, Valentin, Duval u. a.) das Salzige oder das Saure oder alle beide Geschmacksarten als nicht zum eigentlichen Geschmackssinn gehörig rechnen wollten. Ebenso unrichtig ist es z. B., wenn man den Eindruck, den das Ammoniak macht, nicht als Geruch gelten lassen will. Süßer Geschmack ist sehr häufig von verschiedenartigen Nebenempfindungen begleitet (brennende, scharfe, schlüpfrige). Es macht sich bei dieser Frage die oben (S. 631) hervorgehobene Tatsache sehr bemerklich, daß wir keineswegs durch die „spezifischen Energien" der Geschmacksnerven einerseits, der Tastnerven anderseits in den Stand gesetzt werden, echte Geschmacksempfindungen und deren verschiedenartige Begleitempfindungen aus dem Gebiet des Tast- (und Temperatur-)sinnes und des Schmerzes reinlich zu trennen. Nach der Empfindungsqualität gehen die Geschmacksempfindungen und die sonstigen auf der Zunge auslösbaren Empfindungen ohne scharf erkennbare Grenze ineinander über, und nur das besonders angeordnete physiologische Experiment vermag eine Sonderung dieser Sinne einigermaßen überzeugend aufzudecken und damit dem Gesetz der spezifischen Energien auch für die hier in Betracht kommenden sog. niederen Sinne wenigstens eine relative Geltung zu verschaffen.

Von Interesse ist, daß, wie oben schon erwähnt, die Begriffe sauer und salzig nicht von allen Menschen scharf auseinandergehalten werden. In manchen Gegenden Deutschlands nennt die Landbevölkerung das Salz sauer. Auch Kinder verwechseln oft sauer und salzig. Man beachte, daß das Eigenschaftswort salzig anders gebildet ist wie süß, sauer und bitter, ähnlich wie die vom Ungebildeten und vom Kind nicht besonders benannten Farbentöne Orange und Violett andersartige Namen haben als die „Prinzipalfarben" Rot, Gelb, Grün, Blau.

Ältere Autoren rechneten verschiedene Mischempfindungen von Geruch und Geschmack oder auch reine Gerüche zu den Geschmacks-Arten und sprachen von aromatischem, fauligem Geschmack usw. Den Versuch, durch den man die Geruchskomponente leicht ausschließt — Zuhalten der Nase beim Schmecken — gab Chevreul 1824 an [1]).

Als „faden" Geschmack bezeichnete Henle [2]) den Eindruck, den Lösungen bewirken, die ärmer an Salz sind als der Speichel. Öhrwall (l. c.) meint, den Eindruck des „Faden" habe man, wo man Geschmack erwartet und keinen findet. So schmecke destilliertes Wasser fade wegen des Mangels

[1]) Journ. de physiol. expérim. 4, Paris 1824. — [2]) Anthropolog. Vorträge 2, 18, 1880.

an CO_2. Der Vergleich Öhrwalls mit der Schwarzempfindung, die ebenfalls wegen des Fehlens einer erwarteten Empfindung unangenehm sein soll, ist gewiß kein glücklicher.

VIII. Die spezifische Disposition der einzelnen Geschmackspapillen. Die spezifische Energie der Geschmacksnerven.

Oben wurde schon erwähnt, daß die Zone des Zungenrückens, die zum Schmecken nicht befähigt ist, verschieden groß gefunden wird, je nach der Art des Schmeckstoffs, mit der man reizt. Weiter geht aus Untersuchungen, die zuerst von Horn[1]) und von Picht[2]) systematisch angestellt wurden, hervor, daß die Empfindlichkeit für Bitterstoffe am größten am Zungengrunde, für andere Stoffe größer an der Zungenspitze und den Rändern ist, ferner daß ein und derselbe Stoff an verschiedenen Zungenstellen verschieden schmecken kann, z. B. an der Spitze süß, am Grunde bitter. Diese letztere Erfahrung ist durch neuere Erfahrungen (vgl. z. B. Sternberg, Arch. f. Physiol. 1898 und 1903) so erweitert worden, daß man fast sagen kann, alle Substanzen erzeugen je nach der Applikationsstelle verschiedenen Geschmack.

Öhrwall[3]) hat die interessante, von Goldscheider und Schmidt[4]), sowie von Kiesow[5]) bestätigte Beobachtung gemacht, daß die einzelnen Zungenpapillen sich verschieden gegen die verschiedenen Geschmacksarten verhalten. Von 125 Papillen besaßen 27 überhaupt kein Schmeckvermögen; von den übrigen 98 reagierten 91 auf Weinsäure, 79 auf Zucker, 71 auf Chinin. 12 reagierten nur auf Weinsäure, 3 nur auf Zucker, keine nur auf Chinin. Ganz ähnlich fand Kiesow die Verhältnisse. Wenn man auf Grund dieser Befunde nun auch bestimmt sagen kann, daß nicht jede Papille für je eine Geschmacksreizart spezifisch disponiert ist, so geht doch daraus hervor, daß die Papillen in funktioneller Hinsicht große Verschiedenheiten zeigen. Es ist keine unwahrscheinliche Annahme (die Öhrwall aus diesen Versuchen herleitet), daß die einzelnen Geschmacksknospen spezifisch verschiedene Empfänglichkeit für die Geschmacksreize haben, so daß beispielsweise einzelne Knospen nur auf Reizung mit Zucker, andere nur auf Chinin ansprechen usw. Um die Öhrwallschen Befunde zu erklären, muß dann die Hilfsannahme gemacht werden, daß eine Papille bald süßempfindliche und sauerempfindliche, bald sauer- und bitterempfindliche Knospen enthalte usf., und daß es gewissermaßen zufällig nur dahin kommt, daß einmal die Knospen in einer Papille alle von einer spezifischen Disposition sind.

Wie ich schon oben (3, 10 ff.) auseinandergesetzt habe, folgt aus dieser an und für sich plausiblen Hypothese nicht, daß den viererlei spezifisch verschieden disponierten Geschmacksknospenarten nun auch viererlei Geschmacksfaserarten mit verschiedener spezifischer Energie entsprechen (wie man in mißverständlicher Durchführung des Gesetzes der spezifischen Energien annehmen zu sollen geglaubt hat), sondern im Hinblick auf die Verhältnisse bei anderen Sinnen, namentlich dem Gesichtssinn, erscheint es richtiger, anzunehmen, daß die Geschmacksnervenfasern je

[1]) Über den Geschmackssinn des Menschen. Heidelberg 1825. — [2]) De gustus et olfactus nexu etc. Berlin 1829. — [3]) Skandinav. Arch. f. Physiol. 2 (1891). — [4]) Zentralbl. f. Physiol. 4. — [5]) Philosoph. Studien von W. Wundt 14 (1898).

nach der Art ihrer peripheren Erregung Süß- oder Bitterempfindung usw. auslösen. Daß eine Lingualisfaser Geschmacksempfindung im allgemeinen vermittelt, rührte nach dieser Auffassung davon her, daß ihre zentrale Endigung in dem Geschmackszentrum liegt; welche von den verschiedenen Geschmacksqualitäten sie dagegen vermittelt, hinge davon ab, welche spezifische Disposition die Geschmacksknospe hat, die das periphere Endorgan jener Faser darstellt. Man kann fragen, was für eine Bedeutung bei einer solchen Annahme die verschiedene spezifische Disposition der Endorgane noch haben sollte. Ich denke mir, neben den Eigenschaften, die ein Endorgan (hier wäre an die Schmeckzellen zu denken) haben muß, damit es auf die Einwirkung bitterer Stoffe sicher anspricht, werden nicht leicht auch die für die Wirkung saurer und süßer Stoffe günstigen Eigenschaften in gleicher Vollkommenheit entwickelt sein können[1]). Die Arbeitsteilung unter den Endorganen (Sinnessubstanzen) wird also immerhin begreiflich, auch wenn der Sinnesnerv, wie ich es annehme, mancherlei verschiedene Erregungsformen leiten kann.

Es ist hier noch daran zu erinnern, daß in den Tatsachen der elektrischen Geschmacksreizung kein Beweis für die Annahme von viererlei mit verschiedenen spezifischen Energien begabten Geschmacksfaserarten zu finden ist, sondern diese Tatsachen mit der hier vertretenen Anschauung besser im Einklang stehen.

IX. Umstimmungs- und Kontrasterscheinungen.

In gewissem Sinne können schon die Wirkungen des Cocains auf das Geschmacksorgan als Umstimmungserscheinungen aufgefaßt werden; das bitter schmeckende Alkaloid hebt die Fähigkeit, Bitteres zu schmecken, für einige Zeit auf. Andere Bitterstoffe haben diese Wirkung aber lange nicht in diesem Maße, darum muß in der Cocainwirkung eine spezifische Lähmung der Nervenendorgane gesehen werden, die mit dem bittern Geschmack des Stoffes an sich vielleicht nichts zu tun hat.

Man kennt indessen auch echte Umstimmungserscheinungen. Eine der ausgeprägtesten beobachtet man nach Ausspülung des Mundes mit Kaliumchlorat, das selbst nur einen schwachen Geschmack von komplizierter Beschaffenheit besitzt, aber das Geschmacksorgan so umstimmt, daß danach genommenes reines Wasser süß schmeckt (Nagel[2]). Frentzel[3]) fand, daß Ausspülen des Mundes mit Kupfersulfat den Zigarrenrauch süß schmeckend macht. Das gleiche fand ich bei Ausspülung mit Kaliumpermanganat.

Sehr interessant ist eine Beobachtung, die Zuntz[4]) mitteilt. Kochsalzlösung von 0,1 Proz. kann nicht mehr sicher von reinem Wasser unterschieden werden, macht aber den süßen Geschmack des Zuckers (in 12 proz. Lösung) deutlich intensiver. Auch Chinin in einer eben überschwelligen Konzentration wirkt so. Ähnliche Wirkungen beobachtete Heymans[5]).

Kontrasterscheinungen im Gebiete des Geschmackssinns sind mehrfach beschrieben worden. Zum Teil würden die betreffenden Beobachtungen aber besser unter der Bezeichnung „Umstimmungserscheinungen“ registriert. Die Beobachtung von Adducco und Mosso[6]) z. B., daß die

---

[1]) Ich nehme dabei an, daß keine Notwendigkeit für die Voraussetzung einer ganz exklusiven Disposition der Knospen für eine Reizart besteht, sondern vielleicht alle Knospen auf alle Geschmacksreize, aber in sehr ungleichem Maße, reagieren. Dies wäre mit Öhrwalls Ergebnissen nicht unvereinbar. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 10 (1896). — [3]) Zentralbl. f. Physiol. 10 (1897). — [4]) Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1892. — [5]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 21 (1899). — [6]) Giorn. R. Accad. med. 1886.

Zunge nach Eintauchen in verdünnte Schwefelsäure Wasser als süß schmeckend empfindet, reiht sich wohl eher der oben beschriebenen Wirkung des Kali chloricum an; die genannten Autoren geben selbst an, daß andere Säuren nicht dieselbe Wirkung haben. Nicht leicht zu beurteilen ist die allbekannte Erfahrung, daß säuerliche Getränke viel saurer als gewöhnlich schmecken, wenn zuvor Süßes genossen wurde, was schon J. Müller [1]) als Beispiel eines Geschmackskontrastes anführt. Öhrwall [2]) denkt hierbei wohl nicht mit Unrecht mehr an eine Umstimmung des Gefühlstones, d. h. er nimmt an, daß nach dem Süßen das Saure unangenehmer empfunden wird als ohne diese vorherige Einwirkung. Im Experiment mit successiver Einwirkung von starker Zuckerlösung und verschiedenen schwachen Lösungen von Schwefelsäure konnte Öhrwall nicht nur kein Sinken der Schwelle für Sauer feststellen, sondern sogar eine merkliche Erhöhung. Dies stimmt auch mit meinen Erfahrungen überein.

X. Mischungs- und Kompensationserscheinungen.

Wie beim Geruchssinn wird den Mischungs- und Kompensationserscheinungen auch beim Geschmackssinn eine gewisse theoretische Bedeutung zugeschrieben, weil die Hypothesen über die Komponentengliederung der Sinne mehrfach gerade durch Erfahrungen über Effekte mehrerer gleichzeitiger Reizwirkungen bestimmt worden sind. Dies prägt sich z. B. auch darin aus, daß Öhrwall [3]), der am entschiedensten für die Zerlegung des Geschmackssinns in vier, durch spezifische Energien geschiedene „Sinne“ eintritt, das Zustandekommen von Kompensationen zwischen verschiedenen Geschmacksarten bestreitet. Für die Möglichkeit einer Kompensation von Geschmackseindrücken ist schon Brücke [4]) eingetreten, den tatsächlichen Nachweis der gegenseitigen Abschwächung von Geschmacksreizen bis fast zum Erlöschen einer Empfindung hat Kiesow [5]) geliefert. Mischungen von Zucker und Kochsalz in schwachen Lösungen ergaben ihm bei einem bestimmten Mischungsverhältnis sehr schwachen, laugig faden Geschmack, der weder an süß noch an salzig erinnerte. Es tritt also eine neue Mischempfindung auf, unter Abschwächung der gesamten Empfindungsintensität. Die Verhältnisse liegen hier also ähnlich wie beim Geruchssinn.

Stärkere Geschmacksreize geben gemischt einen „Wettstreit“ der Geschmackseindrücke.

Die Richtigkeit der Kiesowschen Beobachtungen steht für mich fest, und jede Theorie des Geschmackssinns wird sich mit ihnen abfinden müssen. Freilich ist damit keineswegs bewiesen, daß jedes beliebige Paar von Geschmacksreizen sich zu einer einheitlichen Mischempfindung vereinigen könnte. Für höhere Reizintensitäten ist dies sogar recht unwahrscheinlich. Sichere Resultate in dieser Richtung sind schwer zu gewinnen, weil sie nur bei streng lokalisierter Reizung gewonnen werden können; nimmt man einige Gramm einer Flüssigkeit in den Mund, die süße und bittere Substanzen enthält, so

[1]) Handb. d. Physiologie d. Menschen 2, 493, 1840. — [2]) l. c. — [3]) l. c. — [4]) Vorlesungen über Physiologie 2, 265, 1885. — [5]) Philosoph. Studien, herausgeg. von W. Wundt, 12 (1896).

erzeugt dieses Gemenge an verschiedenen Zungenpartien verschiedenen Geschmack, und außerdem fallen die beiden Geschmackseindrücke zeitlich auseinander (s. unten S. 644). Dadurch werden die Bedingungen für das Auftreten eines einheitlichen Mischgeschmacks ungünstig, ungünstiger noch als beim Geruchssinn, bei welchem das wichtigste Hindernis für das Entstehen einheitlicher Mischempfindung durch die ungleiche Geschwindigkeit der Ermüdung für verschiedene Geruchsqualitäten gegeben ist, ein Moment, das beim Geschmack entschieden zurücktritt. Eine eigentliche Ermüdung des Geschmackssinnes ist überhaupt nicht nachgewiesen.

Eine für die Praxis der Pharmakologie wichtige und theoretisch interessante Tatsache ist die Einwirkung starker Geruchs- und sog. Gefühlsreize auf Geschmacksempfindungen. Wie gewisse unangenehme Geruchsempfindungen durch intensive Geschmacksreize zurückgedrängt werden können, so auch umgekehrt: Das Prinzip der sog. Geschmackskorrektionen in der Pharmazeutik beruht zum großen Teil auf der Unterdrückung eines unangenehmen bitteren oder sauren Geschmacks durch stark riechende Zusätze (Orangenschalenessenz, Zimt, Pfefferminz usw.). Es handelt sich hierbei, zum Teil wenigstens, um Kompensation des „Unangenehmen" in dem Gesamteindruck, doch kann man sich der Tatsache nicht verschließen, daß starke Reize auf dem Gebiet der Nachbarsinne gewisse Geschmacksreize unmerkbar machen, die ohne jene Einwirkung stark überschwellig wären. Zu prüfen wäre noch, inwieweit Übung hieran etwas ändert.

XI. Die zeitlichen Verhältnisse der Geschmacksempfindung.

Die Zeit, welche zwischen der Einwirkung eines Geschmacksreizes und der Erkennung der Qualität verfließt, ist an verschiedenen Zungenstellen verschieden; sie ist am kürzesten für den salzigen Geschmack, dann folgen: süß, sauer, bitter (v. Wittich[1]), v. Vintschgau und Hönigschmied[2]). Bei letztgenanntem Autor liegen die Reaktionszeiten zwischen 0,16 und 0,21 Sek.

Während der Einwirkung des Reizes kann sich die Qualität der Empfindung ändern. Was als „Nachgeschmack" bezeichnet zu werden pflegt, beruht wohl zum größten Teil auf dem Zurückbleiben schmeckbarer Stoffe auf der Zunge und in den Spalten der umwallten Papillen. Für Überdauern der Empfindung über den Reiz liegt kein Beweis vor.

	Zungenspitze	
	Minimum	Maximum
Salzig	0,25 sec.	0,72
Süß	0,30	0,85
Sauer	0,64	0,70
Bitter	2	7

[1]) Zeitschr. f. rat. Mediz. (3), **31**. — [2]) Arch. f. ges. Physiol. **10**, **12** u. **14**.

Weitere Bestimmungen der Reaktionszeit wurden neuerdings von Beaunis[1]) und von Henry[2]) gemacht und haben zu ganz ähnlichen Resultaten geführt. Beaunis erhielt vorstehende Zahlen (s. Tabelle a. v. S.).

Die Reihenfolge ist hier dieselbe wie bei v. Vintschgau und Hönigschmied, dagegen die Zahl für die Reaktionszeit des bitteren Geschmackes auffallend hoch. Die neuesten Bestimmungen von Kiesow[3]) stimmen mit den Zahlen von Beaunis besser wie mit den auch nach meinen Erfahrungen zu niedrigen Zahlen Hönigschmieds. Henry hat, wie v. Wittich, die saure elektrische Geschmacksempfindung für diese Versuche verwendet und bei verschiedenen Personen Werte zwischen 1 und 5 Sekunden gefunden, die für die einzelne Person ziemlich konstant waren.

XII. Die Unterschiedsempfindlichkeit.

Über die Unterschiedsschwelle der Geschmackseindrücke ist wenig bekannt. Die lange Nachdauer des Geschmackes erschwert hierauf bezügliche Versuche ebenso wie solche über die Ermüdung des Geschmackes ungemein. Camerer[4]) fand das Webersche Gesetz in einiger Annäherung gültig (Versuche mit Chlornatrium und Chinin), ebenso Corin[5]), wenigstens in der Nähe der (einfachen) Reizschwelle. Kepler[6]) sah bei Sauer und Süß die Unterschiedsempfindlickeit mit wachsender Konzentration der Lösungen abnehmen, bei Salzig und Bitter aber im Gegenteil zunehmen, was natürlich nur in engeren Grenzen zutreffen kann.

XIII. Gefühlsbetonung der Geschmacksempfindungen.

Beim kleinen Kinde ist ein deutlicher Unterschied der verschiedenen Geschmacksarten zu bemerken: Das Süße wird im allgemeinen selbst bei hoher Intensität als angenehm empfunden, die übrigen Geschmacksarten bei hoher Intensität stets als unangenehm, während sie bei niedriger Intensität höchstens als indifferent gelten können. Schon ganz kleine Kinder bringen zuweilen durch den Gesichtsausdruck und andere Reaktionen diesen Unterschied deutlich zum Ausdruck. Der süße Geschmack löst hier, ähnlich wie bei vielen Tieren, die Neigung zu Saugbewegungen aus. Bitterer, saurer oder salziger Geschmack dagegen hemmt das Saugen. Später ändert sich das bald.

Beim Erwachsenen sind diese Unterschiede mehr oder weniger verwischt, an Stelle der einseitigen Bevorzugung des Süßen tritt je nach den Umständen die Neigung auf, Saures, Bitteres oder Salziges zu genießen oder mehr oder weniger zusammengesetzte Geschmacksreize zur Anwendung zu bringen. Immerhin bleibt in der Sprache „süß“ ein Ausdruck für etwas Angenehmes, Lusterregendes, während bitter und sauer etwas Unerfreuliches

---

[1]) Recherches expér. sur les conditions de l'activité cérébrale etc. Paris 1884 (zitiert auch Marchand). — [2]) Compt. rend. Soc. de biolog. 1894, p. 682. — [3]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **33**, 453, 1903. — [4]) Arch. f. d. ges. Physiol. **2**, 322 u. Zeitschr. f. Biolog. **21**, 570. — [5]) Arch. de biol. Gand **8**, 121, 1888. — [6]) Arch. f. d. ges. Physiol. **2**, 449.

bezeichnen, mit etwas verschiedener Schattierung. Eine entsprechend übertragene Verwendung des Wortes „salzig“ in der Sprache fehlt.

Mit dem „Faden“ bezeichnen wir stets etwas Unangenehmes, das zugleich nur in geringer Intensität empfunden wird.

Die erwähnten Veränderungen des Gesichtsausdruckes bei Einwirkung von Geschmäcken können als eine Art Reflex aufgefaßt werden. Sternberg[1]) sah sie bei einem *Anencephalus*. Ob es noch andere Geschmacksreflexe gibt, namentlich solche, die im Munde lokalisiert sind, ist schwer zu sagen. In Betracht kommen kann die Salivation beim Genuß gewisser scharfer Speisen, doch ist es zum mindesten zweifelhaft, ob hierbei die eigentlichen Geschmacksnerven in Funktion treten, da es sich zumeist um Stoffe handelt, die scharf brennend wirken.

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **27**, 77, 1902.

Physiologie der Druck-, Temperatur- und Schmerzempfindungen

von

Torsten Thunberg[1]).

„Eine genaue, durch Messungen unterstützte Untersuchung über den Tastsinn und das Gemeingefühl der Haut bietet deswegen ein besonderes Interesse dar, weil wir bei keinem anderen Sinnesorgan Gelegenheit haben, ohne uns zu schaden, die mannigfaltigsten Experimente anzustellen und in verschiedener Hinsicht Messungen auszuführen, und weil manches von dem, was wir auf diese Weise an der Haut beobachten, sich nachher auch auf den Gesichtssinn und auf andere Sinne, sowie auch auf das Gemeingefühl anwenden läßt." E. H. Weber.

I. Geschichtliche Übersicht.

Vielleicht das älteste psychologische Experiment, das wir kennen, gehört der Physiologie der Hautempfindungen an; es handelt sich um die Hervorrufung der Doppelempfindung, welche entsteht, wenn man eine kleine Kugel zwischen dem gekreuzten Mittel- und Zeigefinger einer Hand hält — ein Versuch, den schon Aristoteles[2]) beschrieben hat. Trotz ihrer alten Ahnen blieb doch die Physiologie der Hautsinne länger als die anderen Kapitel der Sinnesphysiologie ein relativ vernachlässigtes Gebiet; in allen älteren Darstellungen der Physiologie bis zu den dreißiger Jahren des 19. Jahrhunderts wurde sie sehr stiefmütterlich behandelt, und erst mit Webers Untersuchungen beginnt die vollständigere und systematische Bearbeitung dieser Funktionen. Die verwandte Frage über das Vermögen der verschiedenen Körperteile, Schmerzempfindungen auszulösen, war dagegen weit eingehender behandelt worden, und schon bei Haller[3]) sind mehrere diese Frage berührende Beobachtungen mitgeteilt.

Zugleich ein Beweis und eine Ursache für diesen lange Zeit rückständigen Standpunkt der Physiologie der Hautsinne liegt darin, daß man seit alters her im allgemeinen alle die verschiedenen Empfindungen, welche von der Haut ausgelöst werden können, unter dem einzigen Begriff: „Tastempfin-

[1]) Der Verf. ist Herrn Dr. H. Piper, Berlin, zu großem Danke verpflichtet, der das Manuskript in sprachlicher Hinsicht revidiert und verbessert hat. — [2]) Metaphysik (Buch III, Kap. 6 und Buch X, Kap. 6). Problemata 35, 10. (Henri: Raumwahrnehmungen, Berlin 1898, S. 67). — [3]) Elementa physiol. corporis humani, Tomus V, Sensus externi, interni. Lausannae 1763.

dungen" zusammenfaßte, ohne dabei die Unterschiede der verschiedenen Sinnesqualitäten zu analysieren. Als erfreuliche Ausnahme hiervon muß der Versuch Pechlins [1]) gelten, welcher zwischen einem Temperatursinn (Caloris et frigoris sensus) und einem Gefühlssinn (tactus) unterschied, wenn auch seine Gründe für diese Trennung jetzt veraltet scheinen. Ende des 18. Jahrhunderts hat auch Erasmus Darwin [2]) für die Scheidung des Temperatursinnes (Sens de la chaleur) vom Gefühlssinn (Sens du toucher) plädiert und zur Stütze seiner Ansicht neben anderen Gründen die Beobachtung geltend gemacht, daß ein Patient, der den Gefühlssinn verloren hatte, doch die Annäherung eines glühenden Eisens wahrnehmen konnte.

Aber diese Versuche, die verschiedenen Hautempfindungen gegeneinander abzugrenzen, welche wir jetzt als eine notwendige Voraussetzung für eine fruchtbringende Behandlung dieses Gebietes anzusehen gewohnt sind, blieben lange unbeachtet und wurden weder fortgesetzt noch erweitert. Erst E. H. Weber [3]) unternahm eine systematische Bearbeitung der Physiologie der Hautempfindungen, eine Bearbeitung, die als bahnbrechend angesehen werden muß. Weber stellte ausgedehnte neue Versuche und Beobachtungen über alle Sinnesqualitäten der Haut an; besonders möge hier erwähnt werden, daß er in dem Gebiete der Druckempfindungen die wichtigen Versuchsreihen über die kleinsten wahrnehmbaren Gewichtsunterschiede durchführte, welche zur Aufstellung des nach ihm genannten Weberschen Gesetzes Anlaß gaben. Bei seinen Versuchen über das Lokalisationsvermögen der Haut hat er unter anderem auch die Methode der kleinsten wahrnehmbaren Spitzendistanz angegeben und den großen Unterschied, welchen verschiedene Hautstellen in dieser Hinsicht zeigen, zuerst festgestellt. Fernerhin führte er den Begriff der „Empfindungskreise" ein und wurde des weiteren durch seine Versuche über die Kälte- und Wärmeempfindungen zu der nach ihm genannten Temperatursinnestheorie geleitet — eine Theorie, welche auf Grund der neueren Untersuchungen als die zurzeit wahrscheinlichste angesehen werden kann. Er gab dann eine interessante Erklärung der Objektivierung und Nichtobjektivierung unserer Hautempfindungen, kurzum, er überschüttete die Wissenschaft mit einer Fülle von neuen Tatsachen und theoretischen Anregungen, und nichts verschafft einen besseren Eindruck von der Experimentierkunst und Gedankenfruchtbarkeit dieses Forschers, als wenn man die Darstellung der Physiologie der Hautsinne in einem Lehrbuch vor und nach der Zeit Webers vergleichsweise studiert.

Für lange Zeit haben die bahnbrechenden Untersuchungen Webers die Forschungsrichtung auf dem Gebiete der Hautempfindungen bestimmt. Das größte Interesse haben dabei lange die Studien über die kleinste wahrnehm-

---

[1]) Jo. Nicol. Pechlini Observationum physico-medicarum libri tres. Hamburgi 1691. Liber tertius, Observat. 9, 410. Zitiert nach Hermann Hoffmann, Stereognostische Versuche. Dissertation. Straßburg 1883. Mehrere geschichtliche Notizen sind da zu finden. — [2]) Erasmus Darwins Zoonomia or the laws of organic life, London 1794. Übersetzung durch J. F. Kluyshens, Tome premier, Gand 1810. Sect. XIV, 2, 183; 6, 202; 7, 206, zitiert nach Hoffmann. Siehe auch Pflüger; Pflügers Arch. 18, 375, 1878. — [3]) Annotationes anatomicae et physiologicae, Lipsiae 1834; Wagners Handwörterbuch der Physiol. 3, 2, Braunschweig 1846.

bare Spitzendistanz absorbiert, während die übrigen Gebiete der Hautsinne fast durchweg stark vernachlässigt blieben.

Eine neue Ära für die Hautsinnesphysiologie ist erst durch die Entdeckung der Kälte-, Wärme- und Druckpunkte durch Blix[1]) (1882) angebrochen, welche nicht nur für die Physiologie der Hautsinne durch die Sicherstellung der Existenz verschiedener Kälte-, Wärme- und Drucknerven, sondern auch für die allgemeine Sinnesphysiologie, besonders für die Müllersche Lehre der spezifischen Sinnesenergien von der größten Bedeutung war. Etwas später als Blix haben Goldscheider (1884)[2]) und Donaldson (1885)[3]) dieselbe Beobachtung gemacht.

Das letzte theoretisch wichtige Entwickelungsstadium der Hautsinnesphysiologie, das gegenwärtige, ist durch die Controverse über die Existenz besonderer Schmerzpunkte und Schmerznerven charakterisiert. Vor allem sind hier die Untersuchungen von v. Frey[4]) zu nennen, welche sichere Beweise für die Existenz der Schmerznerven geliefert zu haben scheinen. Dieses letzte Stadium zeitigte unter anderem sehr wesentliche Fortschritte in der Methodik und ist durch anerkennenswerte Kritik und Zurückhaltung in der theoretischen Verwertung der Resultate ausgezeichnet, ein Punkt, in dem die bezüglichen Untersuchungen der früheren Zeit leider oft sehr zu wünschen übrig ließen.

II. Klassifikation der Hautempfindungen.

Jedermann weiß, daß eine große Anzahl verschiedener Empfindungen von der Haut ausgelöst werden können und auch häufig ausgelöst werden. Schon die äußeren Einflüsse, welchen unsere Haut im täglichen Leben ständig ausgesetzt ist, verursachen mehr oder weniger intensive Empfindungen von Berührung, Druck, Kälte, Wärme, und auch von der Haut ausgelöste Schmerzempfindungen und Empfindungen von Kitzel und Jucken liegen innerhalb der alltäglichen Erfahrung. Wenn man die Haut in systematischen Versuchen der Einwirkung verschiedenartiger und verschieden intensiver Reize — sie mögen mechanischer, thermischer, chemischer oder elektrischer Art sein — aussetzt, so werden dabei ebenfalls Empfindungen ausgelöst. Man kann nun feststellen, wenn man die verschiedenen Reizmittel hinsichtlich ihrer Fähigkeit, Hautempfindungen auszulösen, systematisch durchprüft, daß zwar Empfindungen in anderen Intensitäten und anderen Kombinationen als unter gewöhnlichen Verhältnissen erhalten werden, daß aber qualitativ neue Empfindungen dabei nicht entstehen — auch dann nicht, wenn man Reize anwendet, welche, wie die elektrischen, kaum unter den natürlichen Lebensbedingungen des Individuums vorkommen. Dieses Ergebnis steht in bester Übereinstimmung mit dem Gesetze der spezifischen Sinnesenergien, nach welchem alle Empfindungen, die von einem und demselben Sinnesnerv ausgelöst

[1]) Upsala Läkareförenings förh. **18** (1882/83); die ersten Mitteilungen darüber 28./4. und 20./10. 1882 gemacht. Zeitschr. f. Biol. **20** (1884) u. **21** (1885). — [2]) Monatsh. f. prakt. Dermatol. **3** (1884). Nachher in Goldscheiders Gesammelten Abhandlungen, Leipzig 1898. Als Ges.-Abh. zitiert. — [3]) Mind **10** (1885). — [4]) Berichte der math.-phys. Klasse d. Königl. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. zu Leipzig 1894, 1895. Abhandlungen derselben Gesellschaft 1896. Nachher als Leipziger Ber. resp. Leipziger Abh. zitiert.

werden, bezüglich ihrer Qualität von der Art des Reizes absolut unabhängig sind.

Wenn man nun alle die verschiedenen Hautempfindungen einer psychologischen Analyse unterwirft, sie genau beobachtet und sie mit Hinsicht auf Ähnlichkeit oder Unähnlichkeit miteinander vergleicht, findet man, daß man einfache und zusammengesetzte Empfindungen[1]) unterscheiden muß. Die Qualität der ersteren ist für die psychologische Analyse nicht mehr zerlegbar; die Qualität der zusammengesetzten Empfindungen dagegen läßt Bestandteile unterscheiden, deren jeder selbständig für sich noch wieder variiert werden kann. Diese verschiedenen selbständig variablen Elemente sind zwar in der zusammengesetzten Hautempfindung mehr oder weniger schwierig zu beobachten, können aber für sich, ungemischt, also als einfache Empfindungen auftreten. Es leuchtet ein, daß die Darstellung der Physiologie der Hautsinne von diesen einfachen Elementen ausgehen muß.

Von solchen einfachen Empfindungsqualitäten sind mindestens vier zu unterscheiden, nämlich die Qualitäten der Druckempfindung, der Kälteempfindung, der Wärmeempfindung und der Schmerzempfindung. Es muß indessen die Frage offen gelassen werden, ob sämtliche verschiedene Hautempfindungen zu ihrer Qualität allein aus diesen Qualitätselementen aufgebaut werden können, oder ob nicht außerdem noch andere selbständige Empfindungsqualitäten in sie eingehen und angenommen werden müssen. Vielleicht gibt es mehrere Schmerzqualitäten, vielleicht sind auch die Empfindungen von Kitzel und Jucken als selbständige Empfindungselemente aufzufassen. Übrigens sei schon hier darauf hingewiesen, daß zweifellos auch zusammengesetzte Empfindungen vorkommen, welche nicht nur Hautempfindungsqualitäten, sondern auch von anderen Sinnesnerven ausgelöste Empfindungen als Bestandteile enthalten, z. B. sog. Muskelsinnesempfindungen. (Siehe unten z. B. die Empfindung von Glätte.)

Als Ergebnis der psychologischen Analyse der Hautempfindungen ist, wie gesagt, sichergestellt, daß mindestens vier verschiedene, selbständig variable Empfindungsqualitäten in der Haut ausgelöst werden können. Wenn auch bei jeder Klassifikation der Empfindungen die psychologische Analyse ausschlaggebend sein muß, ist es doch bei den großen Schwierigkeiten, mit welchen eine solche Analyse, die ja auf ganz subjektiven Gründen baut, kämpfen muß, eine Tatsache von größtem Wert, daß die mehr anatomisch-physiologische Forschung zu denselben Resultaten und Folgerungen geführt hat und somit als bedeutsame Stütze für die Richtigkeit jener Schlüsse herangezogen werden kann. Durch die grundlegende Entdeckung der Druck-, Kälte- und Wärmepunkte durch Blix ist nämlich die Existenz besonderer Drucknerven, besonderer Kältenerven und besonderer Wärmenerven sichergestellt, und ferner konnte v. Frey es in hohem Grade wahrscheinlich machen, daß es außerdem noch besondere Schmerznerven gibt.

Auch andere Beobachtungen weisen mit Sicherheit darauf hin, daß es in der Haut mehrere selbständige Sinnesqualitäten mit entsprechenden Endorganen geben muß. Dies zeigen z. B. die Untersuchungen Herzens[2]) und

---

[1]) Siehe hierüber Öhrwall, Skand. Arch. f. Physiol. **11**, 245, 1901. —
[2]) Pflügers Arch. **38**, 93, 1886.

Goldscheiders[1]) über die bei Nervenkompression entstehenden partiellen Empfindungslähmungen: die Kälte- und Druckempfindlichkeit schien dabei mehr herabgesetzt zu werden als die Wärme- und Schmerzempfindlichkeit. Auch die vielen an Nervenkranken beobachteten partiellen Empfindungslähmungen wie auch die Untersuchungen Stranskys[2]) über die Entwickelung der verschiedenen Empfindungsqualitäten in transplantierten Hautstücken geben sehr bestimmte Fingerzeige: die taktile Empfindung tritt meist zuerst und am ausgebreitetsten hervor, während Schmerz- und Temperaturempfindung, namentlich letztere, erst später nachfolgen.

III. Die Sinnespunkte der Haut.

Wenn man über die Haut ohne Druck eine abgekühlte Metallspitze hinführt und die dabei entstehenden Empfindungen analysiert, so findet man, daß sich je nach dem Temperaturgrade der Spitze voneinander abweichende Resultate ergeben. Wenn man eine nicht zu niedrige Temperatur wählt, zeigt sich, daß Kälteempfindungen nur an gewissen, einen oder mehrere Millimeter voneinander liegenden, sehr kleinen, beinahe punktförmigen Hautstellen erhalten werden, während sie an den dazwischenliegenden Partien nicht ausgelöst werden können. Diese kleinen Stellen der Haut, welche bei nicht zu starker Reizung einzig imstande sind, Kälteempfindungen zu geben, sind ganz unverrückbar auf oder in der Haut, an stets wieder auffindbaren Orten gelegen. Wenn man ihre Lage mit Farbe dauernd kennzeichnet, kann man sie nach beliebig langer Zeit stets leicht wieder identifizieren. Untersucht man die Haut mit einer stärker abgekühlten Spitze, so können zwar Kälteempfindungen auch an den zwischenliegenden Partien ausgelöst werden, doch ist die Empfindlichkeit hier geringer als an den früher markierten Orten; je größer der Abstand zwischen diesen, bei schwacher Reizung allein empfindlichen Punkten und der gereizten Hautstelle ist, desto geringer erweist sich die Empfindlichkeit dieser letzteren. Man bezeichnet diese für Kältereize maximal empfindlichen Punkte, um die die Empfindlichkeit mit der Entfernung abnimmt, als „Kältepunkte“ (Blix).

Untersucht man die Haut in gleicher Weise mit einer warmen Spitze, so findet man ebenso Punkte, welche eine maximale Empfindlichkeit für Wärmereize besitzen und mit Wärmeempfindungen antworten — Wärmepunkte (Blix). Man findet weiter bei Reizung mit Druckreizen maximal empfindliche, mit Druckempfindungen antwortende Druckpunkte (Blix) und endlich Schmerzpunkte, die Schmerzempfindungen (Stichempfindungen) auslösen und mit dieser Empfindungsqualität am promptesten auf thermische, mechanische und elektrische Reize reagieren (v. Frey[3]). Alle diese Sinnespunkte, die Druck-, Kälte-, Wärme- und Schmerzpunkte, fallen nicht miteinander zusammen, sondern nehmen verschiedene Orte in der Haut ein.

---

[1]) Ges. Abh. **1**, 275. — [2]) Wien. klin. Wochenschr. 1899, S. 833. — [3]) Schon Blix hatte die Existenz solcher für mechanische Reizung (Nadelstiche) besonders empfindlicher Punkte, welche Schmerzempfindungen auslösen, festgestellt, aber erst v. Frey fand, daß die Verhältnisse hier ganz analog denjenigen der anderen Sinnespunkte liegen.

Die einzig plausible Deutung dieser Verhältnisse ist die, daß die Haut verschiedene Sinnesnerven — Drucknerven, Kältenerven, Wärmenerven und Schmerznerven — besitzt, daß diese Nerven unmittelbar unter der Hautoberfläche, eventuell mit besonderen Endorganen endigen, und daß die Sinnespunkte die an die Hautoberfläche hinaus projizierten Nervenenden oder Endapparate darstellen. Daß auch von den zwischenliegenden Hautpartien bei kräftigerem Reiz Empfindungen ausgelöst werden können, ist mit dieser Annahme ganz wohl vereinbar, da ja die Reize zu dem Endorgan nicht nur von einem senkrecht darüberliegenden Punkt, sondern auch von mehr zur Seite liegenden Punkten dringen können, wobei dann natürlich der Reizeffekt mit dem Abstand vermindert wird; diese Befunde fordern also keineswegs die Annahme, daß empfindliche Endorgane auch unter diesen Zwischenfeldern liegen.

Obgleich durch einen flächenförmigen Reiz nur zerstreut liegende Endorgane in der Haut gereizt werden, hat man doch den Eindruck einer kontinuierlichen Berührungsfläche. Dies ist nur ein Spezialfall des allgemeinen Gesetzes, daß wir Lücken in der räumlichen Anordnung der Sinnesnerven ausfüllen, ein Gesetz, welches bekanntlich besonders gern und elegant durch Versuche begründet und illustriert wird, durch welche die Vollständigkeit des Sehfeldes trotz Vorhandensein des blinden Fleckes im Auge dargetan wird. Als Ursache für dieses Zusammenfließen der von den verschiedenen Hautpunkten ausgelösten Empfindungen ist auch der Umstand hervorgehoben worden, daß jeder Sinnespunkt, einzeln gereizt, nicht eine punktförmige, sondern eine „scheibenartige“ Empfindung geben soll (Goldscheider[1]). Wenigstens soll dies von den Kälte- und Wärmepunkten gelten, während man von der durch einen Druckpunkt ausgelösten Empfindung vielleicht besser sagen kann, daß sie zwar durch ein dem punktförmigen nahe kommendes, aber breiteres und volleres Gefühl charakterisiert ist (Goldscheider[1]). Als Erklärungsgrund für den kontinuierlichen Flächeneindruck wäre ein solches Verhalten nur dann zu verwerten, wenn die Reizung jedes besonderen Sinnespunktes den Eindruck mindestens einer so großen Fläche gäbe, daß sie den nächstliegenden Sinnespunkt halbwegs erreichte, was indessen nichts weniger als wahrscheinlich ist. Bedenkt man, daß auch die hier und da zwischen den Sinnespunkten befindlichen, bis zentimetergroßen Lakunen bei Flächenreizen gar nicht als Lücken empfunden werden, so scheint es, daß es die psychische Tendenz, Lücken in der räumlichen Anordnung unserer Sinnesnervenenden auszufüllen, selbst ist, welche als bestimmender Faktor den kontinuierlichen Flächeneindruck ohne weiteres erklärt. Wäre diese Neigung nicht da, so würden wir, auch wenn die Reizung eines Sinnespunktes eine scheibenartige Empfindung gibt, meistens nur disparate Scheiben statt disparater Punkte wahrnehmen, nicht aber ein Kontinuum.

Die Methoden zur Aufsuchung der Sinnespunkte. Die Apparate zur Aufsuchung der Kälte- und Wärmepunkte können sehr einfach sein. Am besten wendet man wie Blix hohle Metallspitzen an, welche durch inwendig strömendes Wasser auf einer konstanten Temperatur gehalten werden. Modi-

[1]) Ges. Abh. 1, 116 u. 191.

fikationen für verschiedene Zwecke sind u. a. von Alrutz[1]) und Kiesow[2]) angegeben worden. Für eine genaue Bestimmung der Druckpunkte genügte zwar schon der von Blix konstruierte Apparat allen Forderungen an wissenschaftliche Exaktheit, derselbe war aber etwas unbequem zu handhaben. In dieser Beziehung haben dagegen die von v. Frey[3]) angegebenen Reizhaare wesentliche Vorzüge, zu denen noch der hinzukommt, daß sie auch zum Aufsuchen der Schmerzpunkte geeignet sind. An das eine Ende eines leichten, etwa 8 cm langen Holzstäbchens wird ein möglichst wenig gekrümmtes Haar oder ein Stück eines solchen senkrecht zur Achse des Stäbchens festgeklebt, so daß es nach einer Seite ungefähr 20 bis 30 mm, unter Umständen auch noch weiter vorsteht. Man braucht eine größere Anzahl solcher Stäbchen, für welche man Haare verschiedener Stärke auswählt. Jedes solches Stäbchen stellt bei richtigem Gebrauch ein Reizwerkzeug von bestimmter, innerhalb enger Grenzen liegender Wertigkeit dar. Setzt man nämlich das Haar möglichst senkrecht zur Hautfläche auf und drückt, bis es sich schwach biegt, so übt jedes einzelne Haar einen bestimmten Druck aus, und der Wert dieses Druckes ist auf der Wage bestimmbar. — An Stelle von Haaren kann man auch feine Glasfäden oder Lamettadrähte anwenden[4]). — Es ist nun bei Auswahl und Benutzung eines angemessenen Reizhaares nicht schwer, die verschiedenen Druckpunkte herauszufinden, und auch die Schmerzpunkte lassen sich mit diesen Apparaten bestimmen. (Über die zur Bestimmung des Reizwertes jedes Haares nötigen Konstanten siehe unten, S. 661 f.)

Die Zahl und Anordnung der Sinnespunkte. Die ältesten, allerdings sehr spärlichen Angaben hierüber rühren von Blix her. Er fand, daß die Kältepunkte zahlreicher als die Wärmepunkte sind, daß sie unregelmäßig angeordnet in hier und da dichteren Anhäufungen liegen und daß an den behaarten Stellen der Haut die Druckpunkte im allgemeinen mit den Haarpapillen zusammenfallen; hier und da können einzelne Druckpunkte zwischen den Haarpapillen gefunden werden (rudimentäre Haarpapillen?). Blix sieht weiter als wahrscheinlich an, daß alle Haare der Haut in dieser Weise als Tasthaare angesehen werden können, und neuere eingehende Untersuchungen haben in der Tat diese Ansichten als zutreffend bestätigt und erweitert. So hat Sommer[5]) die von Blix angegebene Relation der Zahl der Kälte- und Wärmepunkte näher bestimmt. Hierbei wurden auf 1 qcm Haut beim Erwachsenen zwischen 6 und 23 Kältepunkte und zwischen 0 und 3 Wärmepunkte gefunden, im Mittel also pro Quadratzentimeter 12 bis 13 Kälte- und 1 bis 2 Wärmepunkte. Sommer berechnete daraus die Zahlen für die ganze Hautoberfläche zu etwa $^1/_2$ Million Kälte- und 30 000 Wärmepunkten. Die Zahl der Tastnervenenden schätzt v. Frey[6]) in ähnlicher Weise für die Oberfläche des Körpers mit Ausschluß des Kopfes auf ungefähr 500 000, und dem entspricht eine Mittelzahl von 25 Druckpunkten auf den Quadratzentimeter bei einer Körperfläche von 2 qm. Die Zahl der Schmerzpunkte ist bisher nicht

[1]) Skand. Arch. f. Physiol. **10**, 341, 1900. — [2]) Wundts philos. Stud. **14**, 589, 1899. — [3]) Leipz. Abh. 1896, S. 208. — [4]) Siehe Hensen, Arch. f. Ohrenheilkunde **35**, 173, 1893. Thunberg, Upsala Läkaref. förh. **1**, 294, 1895/96. — [5]) Sitzungsber. d. phys.-med. Gesellsch. zu Würzb. 1901 (weiterhin als Würzburger Ber. zitiert). — [6]) Würzburger Ber. 1899. Über den Ortssinn d. Haut, S. 4.

genauer geschätzt worden. Nach den Angaben v. Freys[1]), daß im Quadratzentimeter 100 bis 200 Schmerzpunkte auf einer Stelle des Handrückens zu finden sind, würde sich die ganze Zahl etwa auf 2000000 bis 4000000 belaufen. Auch die Angaben Blix' über das Verhältnis der Druckpunkte zu den Haaren wurde von v. Frey bestätigt. Was die behaarten Stellen der Körperoberfläche betrifft (also etwa 95 Proz. der gesamten Oberfläche), so finden sich die Druckpunkte auch nach seinen Versuchen in einem sehr charakteristischen Lageverhältnis zu den Haarpapillen. Jedes Haar hat einen Druckpunkt nahe seiner Austrittsstelle und in der Projektion des schiefstehenden Balges auf die Oberfläche. Möglich bleibt immerhin nach den Untersuchungen von v. Frey, daß sich doch auch innerhalb der behaarten Flächen zerstreute Druckpunkte finden, denen kein Haar entspricht.

Die in den Lehrbüchern der Physiologie im allgemeinen wiedergegebenen Angaben Goldscheiders stehen in auffälligem Gegensatz zu den ersten Angaben Blix' und zu denen von v. Frey und seinen Mitarbeitern, ebenso wie auch zu den Ergebnissen der von anderen (Alrutz, Kiesow) gemachten Untersuchungen. Goldscheider[2]) zeichnet z. B. den Raum zwischen den Haaren mit Druckpunkten dicht erfüllt und hat auch die Kälte- und Wärmepunkte sehr dicht ausgezeichnet. (So fand er in einem Hautfelde des linken Handrückens 68 Kälte- und 56 Wärmepunkte pro Quadratzentimeter; Sommer konnte dagegen nur 13 bzw. 2 pro Quadratzentimeter finden.) Es scheint demnach fraglich, ob Goldscheider nur die wirklichen Sinnespunkte aufgesucht hat. Sicher ist, daß die Angaben und Zeichnungen Goldscheiders ganz auffallend von den Darstellungen aller anderen Forscher abweichen. Auch die Goldscheiderschen[3]) sehr detaillierten Angaben, daß die Kälte-, Wärme- und Druckpunkte sich zu meist leicht gekrümmt verlaufenden linearen Ketten aneinander reihen, welche von gewissen Punkten der Haut radien- oder büschelartig nach verschiedenen Richtungen hin ausstrahlen, müssen als noch nicht genügend begründet angesehen werden, da ja diese Behauptungen wahrscheinlich auf teilweise unrichtigen Bestimmungen von Sinnespunkten basieren. Zurzeit scheint die alte Angabe Blix', daß die Punkte unregelmäßig verstreut sind, mit Anhäufungen hier und da, noch Gültigkeit beanspruchen zu dürfen. Man hat wohl übersehen, daß bei einer solchen Unregelmäßigkeit stellenweise der Anschein einer kettenartigen Aneinanderreihung entstehen kann, und daß wir unter Umständen geneigt sind, auch ganz unregelmäßig verteilte Punkte als zu besonderen Linien und Figuren zusammengeordnet aufzufassen. Was endlich die in Goldscheiders ersten Mitteilungen gegebenen Abbildungen der Schmerzpunkte betrifft, so werden sie von ihm selbst nicht mehr anerkannt[4]).

Die anatomischen Bildungen, welche den Sinnespunkten entsprechen. Betreffend die sensiblen Nervenendigungen der Haut muß auf die Lehrbücher der Histologie verwiesen werden[5]). Nur sei hier darauf auf-

[1]) Leipz. Abh. 1896, S. 245. — [2]) Ges. Abh. 1, Tafeln am Ende. — [3]) Ebenda, S. 223. — [4]) Über den Schmerz, Berlin 1894, S. 12. — [5]) Besonders mag Hans Rabls Histologie der normalen Haut des Menschen im Handbuch der Hautkrankheiten von Mračeк, Wien 1901, empfohlen werden. Siehe auch Kiesow, Wundts philos. Stud. 19, 260, 1902, wo mehrere geschichtliche Notizen zu finden sind.

merksam gemacht, daß die Entscheidung, ob ein Hautnerv zentripetal- oder zentrifugalleitend ist, nicht immer ganz einfach ist.

Zwar hat man sich daran gewöhnt, alle die Hautnerven, welche nicht in den glatten Muskeln der Gefäße oder der Haare oder in den Hautdrüsen enden, ohne weiteres als sensibel anzusehen und insbesondere die Nervenenden im Stratum germinativum der Haut als ohne Zweifel zentripetalleitend in Anspruch zu nehmen. Jedoch die Berechtigung dieser Anschauung ist nicht bewiesen und die Möglichkeit keineswegs ausgeschlossen, daß zentrifugale Nerven zu den Zellen des Stratum germinativum gehen und in irgend einer Weise ihre Funktion — die vielleicht komplizierter ist, als jetzt stillschweigend vorausgesetzt wird — regulieren. Man muß sich darüber klar sein, daß unter solchen Verhältnissen etwas Unsicheres in den Versuchen liegt, die anatomischen Substrate der Sinnespunkte ausfindig zu machen. Solange freilich nichts Bestimmtes über die Existenz zentrifugaler Hautzellnerven vorliegt, können und müssen diese wohl bei unseren Erörterungen beiseite gelassen werden. Betreffs der vielen von der Histologie beschriebenen Nervenenden entsteht nun die Frage, welches im speziellen ihre Funktion sei, und da müssen wir eingestehen, daß wir auf diese Frage zurzeit eine nur sehr unvollständige Antwort zu geben vermögen.

Als sicher kann angesehen werden, daß den Druckpunkten das Nervengeflecht an der Wurzelscheide der Haare entspricht. Doch ist es zurzeit nicht entschieden, ob in dieses Nervengeflecht nur Drucknerven eingehen oder ob dort zugleich auch Schmerznerven endigen. Der Beweis für die Korrespondenz zwischen den Druckpunkten und dem Nervengeflecht in der Wurzelscheide der Haare liegt in der schon von Blix[1]) nachgewiesenen und später besonders von v. Frey[2]) bestätigten Tatsache, daß jedes Haar einen Druckpunkt nahe seiner Austrittsstelle und in der Projektion des schief stehenden Balges auf die Oberfläche hat.

Es ist weiter sehr wahrscheinlich, daß auch die Meißnerschen Körperchen als Druckendorgane zu betrachten sind (Blix[3]), v. Frey[4]) und daß sie an den nicht behaarten Stellen gewissermaßen die Stelle der Haare vertreten, wofür ihre räumliche Ausbreitung besonders an den nicht behaarten Hautpartien entschieden spricht.

Daß gewisse sehr oberflächlich liegende Nervenenden im Dienste des Schmerzsinnes stehen, muß als sicher betrachtet werden, und die von v. Frey[5]) ausgesprochene Meinung, daß die freien intraepithelialen Nervenenden die oberflächlichen Schmerzempfindungen vermitteln, hat viel für sich. Wenn man aber die histologischen Bilder mit den von v. Frey gegebenen Abbildungen der Lage der Schmerzpunkte vergleicht, kann man doch einige Bedenken nicht unterdrücken. Die histologischen Bilder wenigstens von einigen Hautstellen scheinen dichter liegende Schmerzpunkte oder auch Schmerzlinien und Schmerzflächen zu fordern und stimmen kaum mit den von v. Frey gegebenen Zeichnungen überein, nach welchen alle Schmerzpunkte gleichgroß und punktförmig und voneinander durch große Zwischenräume getrennt sind. Zwar ist es nicht unmöglich, daß der Gegensatz nur scheinbar ist und sich

[1]) Zeitschr. f. Biol. **21**, 157, 1885. — [2]) Leipz. Ber. 1894, S. 287. — [3]) A. a. O., S. 156. — [4]) A. a. O., S. 296. — [5]) Ebenda 1895, S. 180.

dadurch löst, daß jeder Schmerzpunkt einem Büschel von freien Nervenenden entspricht. Doch sind auch andere Möglichkeiten zu berücksichtigen. Möglicherweise dürfte die räumliche Ausbreitung der Schmerzpunkte bei genauerer Untersuchung an verschiedenen Orten verschieden gefunden werden; vielleicht sind ja auch nicht alle intraepithelialen Nervenenden Schmerznerven. Endlich ist auch die von v. Frey diskutierte Vermutung im Auge zu behalten, daß die Merkelschen Tastzellen mindestens an gewissen Hautstellen im Dienste des Schmerzsinnes stehen. Die lange Reaktionszeit der Schmerzempfindungen und die niedrige Schmerzschwelle können als Gründe für die Annahme angeführt werden, daß die Schmerzempfindungen von mehr differenzierten Bildungen ausgelöst werden, als es die freien Nervenendigungen sind.

Noch unsicherer wird der Boden, wenn es gilt, die Endorgane der Kälte- und Wärmenerven zu bestimmen. v. Frey[1]) hat aber auch hier einige Anhaltspunkte zu geben versucht. Da die Endkolben Krauses in der Conjunctiva und in der Glans penis vorkommen, wo die Druckempfindung fehlt, wohl aber Kälteempfindung vorhanden ist, und da sie besonders dicht in dem Randteile der Bindehaut des Auges zu finden sind, wo auch die Wärmeempfindung fehlt, aber deutliche Kälteempfindungen ausgelöst werden, so sind sie nach v. Frey wahrscheinlich die Organe der Kälteempfindung. Das sind aber bis jetzt auch die einzigen brauchbaren Anhaltspunkte, und weitere Untersuchungen sind zur Entscheidung der Frage sehr erwünscht, ob die Krauseschen Endkolben in der Haut in der nötigen Zahl vorkommen, um die dort nachweisbaren Kältepunkte zu decken.

Wegen der Schwierigkeit, genau die Lage und die Begrenzung der Wärmepunkte zu bestimmen, wie auch wegen der langen Reaktionszeit der Wärmeempfindungen, ist es wahrscheinlich, daß die Wärmepunkte den tiefliegenden anatomischen Bildungen entsprechen[2]). v. Frey hat dabei die Aufmerksamkeit darauf gerichtet, daß die Ruffinischen Endigungen den Forderungen am besten gerecht werden.

Dieser Versuch, anatomische und sinnesphysiologische Erfahrungen nach statistischer Methode miteinander in Beziehung zu setzen, kann aber, wie v. Frey hervorhebt, nur Wahrscheinlichkeiten, keine sicheren Schlüsse zutage fördern. Die Forschungsergebnisse des einen wie des andern Gebietes sind ohne Rücksicht aufeinander gewonnen worden und zeigen bei großer Genauigkeit in gewisser Richtung oft Lücken gerade dort, wo Bezugnahme auf Erfahrungen des andern Gebietes möglich wäre.

IV. Die Druckempfindungen.

Unter Druckempfindungen werden hier alle die Empfindungen zusammengefaßt, welche eine zwar nicht durch Worte beschreibbare, aber doch für alle mit diesen Empfindungen Begabten eine wohlbekannte, von den anderen Empfindungen verschiedene Qualität haben und welche normalerweise bei schwächerer oder mittelstarker mechanischer Hautreizung entstehen.

---

[1]) Leipz. Ber. 1895, S. 181. — [2]) v. Frey, Leipz. Ber. 1895, S. 183. Thunberg, Upsala Läkaref. förh. 30, 545, 1894/95.

Unter den Druckempfindungen werden hier also auch die sog. Berührungsempfindungen („einfache Tastempfindungen") einbegriffen. Die von Meißner[1]) herrührende Auffassung, daß diese letzteren Empfindungen sui generis seien, ist seit langem widerlegt. Es handelt sich hier nur um schwache Druckempfindungen, welche wie diese nur durch Deformationen der Haut ausgelöst werden. Ein Gegenstand, der die Haut berührt, ohne irgend welchen Druck gegen die Haut auszuüben, ist überhaupt nicht imstande, eine Berührungsempfindung hervorzurufen.

Druckempfindungen können nicht nur von der äußeren Haut ausgelöst werden, sondern auch von der Mundhöhle, den Zähnen (Steiner[2]), der Zunge, dem Naseneingang. Dagegen besitzt nach v. Frey[3]) Glans penis keine Druckempfindlichkeit. Hinsichtlich der Cornea sind die Angaben widersprechend; von einigen Autoren wird angegeben, daß die Cornea auch auf Berührung mit der entsprechenden Empfindung reagiert[4]), von anderen wird das bestritten[5]). Vielleicht gibt es in dieser Hinsicht individuelle Unterschiede, vielleicht auch sind für die wechselnden Versuchsresultate die nicht oder kaum schmerzenden Merkmale schwächster Stechempfindungen verantwortlich zu machen (s. unten). Übrigens wäre es denkbar, daß eine nähere Analyse zeigen könnte, daß der Cornealempfindung ihre eigene, zwischen denjenigen der gewöhnlichen Druck- und Schmerzempfindungen liegende Qualität zukommt und sie einen nicht differenzierten Druckschmerzsinn repräsentierte. Auch von tieferen Teilen, den Fascien, Sehnen, Muskeln, dem Periost, werden nach Strümpell[6]) Druckempfindungen ausgelöst. Unter pathologischen Verhältnissen können diese unabhängig von den oberflächlichen Druckempfindungen wegfallen. Strümpell glaubt, daß sie von größter Bedeutung bei Abschätzung von Druckunterschieden sind und will für sie den Namen „Drucksinn" vorbehalten, da die richtige Perzeption größeren Druckes durch sie vermittelt werden soll. Um die gewöhnliche Nomenklatur nicht ändern zu müssen, dürfte es doch angemessener sein, diese Empfindungen als den Drucksinn der tieferen Teile zu bezeichnen, zum Unterschied von dem Drucksinn der Haut. Übrigens ist es fraglich, inwieweit von tieferen Teilen ausgelöste, dumpfe Schmerzempfindungen hier mitspielen.

Die teleologische Bedeutung der Druckempfindungen besteht darin, daß sie Nachricht von schwächeren mechanischen Einwirkungen geben, welche die Haut und einige Schleimhäute treffen. Da solche schwache Einwirkungen im allgemeinen dem Körper weder nützlich noch schädlich sind, ist auch der Gefühlston der Druckempfindungen indifferent.

Da der mechanische Reiz zu den allgemeinen Nervenreizen gehört, könnte man denken, daß es sich auch bei der Erregung der peripheren Drucknerven nur um eine entsprechende allgemeine Nervenreizung handle. Einer solchen Auffassung widersprechen indessen folgende Tatsachen: 1. Die Druckempfindungen entstehen bei einem so schwachen mechanischen Reiz, daß er bei weitem nicht den Schwellenwert des allgemeinen Nervenreizes erreicht. Tigerstedt[7]) z. B. hat gefunden, daß der Schwellenwert für mechanische

[1]) Beitr. z. Anat. u. Physiol. der Haut, Leipzig 1853. Siehe auch: Vaschide et Rousseau, Sur une nouvelle forme de sensibilité tactile: la trichesthésie, Compt. rend. **135** (4), 259. — [2]) Zentralbl. f. Physiol. 1901, S. 585. — [3]) Leipz. Ber. 1895, S. 179. — [4]) W. A. Nagel, Pflügers Arch. **59**, 563, 1895; A. Molter, Über die Sensibilitätsverhältnisse der menschlichen Cornea, Diss., Erlangen 1878; H. H. Donaldson, Mind **10**, 399, 1885; M. Dessoir, du Bois-Reymonds Arch. 1892, S. 145. — [5]) Hoggan, Linnean Soc. Journ. Zoology **16**, 82; v. Frey, Leipziger Ber. 1895, S. 166. — [6]) Deutsche medizinische Wochenschrift 1904, S. 1411 u. 1460. — [7]) Studien über mechan. Nervenreizung, S. 66, Helsingfors 1880.

Nervenreizung durch ein Gewicht von 0,2 g repräsentiert würde, welches aus 1 mm Höhe fiel und demnach den Nerven mit einer Geschwindigkeit von 140 mm/sec erreicht. Die dadurch geleistete Arbeit ist mehrere hundertmal, vielleicht viel tausendmal größer als die zur Erregung der peripheren Drucknerven erforderliche Deformationsarbeit. Diese Tatsache nötigt zu der Annahme, daß in den Enden der Drucknerven oder um dieselben herum Vorrichtungen existieren müssen, die imstande sind, den schwachen mechanischen Reiz in Nervenreiz zu transformieren, mit anderen Worten, daß die Drucknerven mit Endorganen versehen sind. Für diese Annahme spricht auch, 2. daß andauernder Druck erregend auf das Tastorgan wirkt, nicht aber auf den peripheren Nerv. 3. Nach stärkeren und namentlich nicht zu kurz dauernden Belastungen der Haut überdauert die Empfindung den äußeren Reiz.

Die Wirkungsweise der Endorgane kann entweder darin bestehen, daß der äußere Reiz auslösend auf in dem Endorgan aufgespeicherte Energie wirkt; in diesem Falle entsteht also die dem Erregungsvorgang in der Nervenfaser eigentümliche Energieform nicht aus der Arbeit des Reizes, sondern auf Kosten von chemischen Umsetzungen im Endorgan, für welche der Reiz nur den Anstoß darstellt. Das Endorgan könnte aber auch vielleicht als ein Transformator wirken, welcher ohne Zuschuß von neuer Energie den mechanischen Reiz in eine Energieform umzuwandeln hätte, für welche die Nervenenden empfindlicher sind als für mechanischen Reiz. Welche von diesen Möglichkeiten in der Tat verwirklicht ist, ist zurzeit nicht entschieden.

Der adäquate Reiz der Drucknerven und seine Wirkungsweise. In dem Ausdruck „adäquater Reiz" ist der Begriff adäquat gebraucht worden, um den nahen Zusammenhang auszudrücken, welcher tatsächlich zwischen jedem einzelnen Sinnesnerv und einem bestimmten, in der Natur primär vorkommenden und unter normalen Verhältnissen den Nerv treffenden Reiz besteht, und in Übereinstimmung hiermit wird in dieser Darstellung der Hautsinnesphysiologie unter dem adäquaten Reiz für einen gewissen Nerven der Reiz verstanden, welchem seine Endorgane angepaßt sind.

Wenn man von der gewöhnlichen Klassifikation der Reize in mechanische, thermische, chemische usw. ausgeht, ist es ja ohne weiteres einleuchtend, daß die Endorgane der Drucknerven für die Haut treffende mechanische Reize angepaßt sind. Indessen wirkt der mechanische Reiz nicht direkt auf die Enorgane, sondern trifft nur die Hautoberfläche, und da ja die Endorgane in der Haut eingeschlossen liegen, kann der Reiz nur mittelbar dadurch wirksam werden, daß die Endorgane durch die Veränderung der Hautbeschaffenheit affiziert werden, welche sich beim Auftreffen des mechanischen Reizes vollzieht. Es erhebt sich also die Frage, durch welche in ihrer nächsten Umgebung und in ihnen selbst hervorgebrachte Veränderung die Endorgane unmittelbar reizbar sind. Diese Frage ist durch Untersuchungen von v. Frey und Kiesow[1]) an Druckpunkten der unbehaarten Hautstellen in der Weise beantwortet, daß es das Druckgefälle ist, welches die Druckendorgane in Erregungszustand bringt.

[1]) Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorg. 20, 126, 1899.

Wenn eine Spitze gegen die Haut drückt, ist der Druck an der der Spitze anliegenden Hautoberfläche am größten, nimmt aber sowohl nach den tieferen, wie nach den seitlich umliegenden Hautpartien mehr und mehr ab. Es existiert also hierbei ein von der Oberfläche nach der Tiefe negatives Druckgefälle. In derselben Weise entsteht ein Druckgefälle, wenn man eine kleine Lamelle an der Haut festklebt und nachher einen Zug daran ausübt. Es wird eine Druckentlastung zur Ausbildung gelangen, welche an der anklebenden Stelle am größten ist, aber tiefer in der Haut oder seitwärts kleiner wird, d. h. also ein von der Oberfläche nach der Tiefe positives Druckgefälle. Nur wenn die Endorgane unter der Einwirkung eines solchen Druckgefälles von genügender Stärke stehen, werden sie gereizt. Die Erregung der Druckendorgane ist eine Funktion des an seinem Orte herrschenden Druckgefälles, und dabei ist die Größe, nicht die Richtung des Druckgefälles maßgebend. Die Empfindung tritt bei merklich derselben Reizstärke sowohl bei Zug wie Druck auf die Haut hervor und hat bei diesen beiderlei Reizungsweisen denselben Charakter. Die Erregung des Druckendorganes hängt des weiteren von dem zeitlichen Ablauf des Druckgefälles ab derart, daß nur dann das Endorgan gereizt wird, wenn das Druckgefälle hinreichend schnell zur Ausbildung gelangt.

Die Abhängigkeit der Druckempfindung, insbesondere ihres Schwellenwertes, von verschiedenen Faktoren. Die mechanischen Reize, welche Druckempfindungen auslösen, können in mannigfacher Weise variiert werden, und es ist jetzt zu untersuchen, wie die Druckempfindungen von den verschiedenen Variablen abhängen. Hat man z. B. als Reizmittel ein fallendes Gewicht gewählt, so fragt es sich, in welcher Weise seine Größe, seine Geschwindigkeit, seine Berührungsfläche, die von ihm an der Haut geleistete Arbeit für den Reizerfolg bedeutsam sind. Da indessen die Reize die Endorgane selbst nicht treffen, sondern mittelbar durch eine in der Haut gesetzte Deformation einwirken, kann die Aufgabe zunächst dahin vereinfacht werden, daß die Abhängigkeit der Druckempfindungen von den Merkmalen der Hautdeformation zu bestimmen ist, wobei als wesentliche Faktoren nach den Untersuchungen von v. Frey und Kiesow[1]) die Geschwindigkeit, der Ort, die Größe und die Tiefe der Deformation in erster Linie in Betracht kommen.

Die Geschwindigkeit der durch einen mechanischen Reiz hervorgebrachten Deformation der Haut wirkt in der Weise, daß langsam anwachsende Deformationen viel tiefer in die Haut eindringen müssen, um fühlbar zu werden, als rasche, was ja mit dem Verhalten, welches alle anderen daraufhin untersuchten schnell reagierenden Gebilde gegenüber den zeitlichen Änderungen der Reizmittel an den Tag legen, übereinstimmt. Bei einer Belastungszunahme von 0,75 g in einer Sekunde betrug z. B. in einem von v. Freys Versuchen die Belastungsschwelle für eine Oberfläche von 21,2 qmm (auf dem Daumenballen) 2,5 g, und sank bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 4,4 g in einer Sekunde auf 0,33 g, bei einer von mehr als 5 g in einer Sekunde auf 0,25 g herab. Belastungsgeschwindigkeiten,

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane 20 (1899).

welche den Wert von 5 g in einer Sekunde (5 g/sec.) übersteigen, gewinnen nur wenig an Wirksamkeit. Die von v. Frey gewonnenen Werte hat Hoorweg[1]) als mit seinem Erregungsgesetz übereinstimmend gedeutet. Die Schwierigkeiten, die sich einer solchen Deutung entgegenstellen, können vielleicht daraus erklärt werden, daß zwischen dem Orte der Reizapplikation und dem Endorgan ein elastisches und Nachwirkungen zeigendes Gebilde, die oberflächlichen Hautschichten, eingeschaltet ist. Aus der Bedeutung des zeitlichen Ablaufes folgt, daß die im Tastorgan gesetzte Erregung durch die lebendige Kraft des deformierenden Reizes nicht eindeutig bestimmt ist. Wenn also zwei verschiedene Gewichte aus Höhen herabfallen, welche den Massen umgekehrt proportional sind, so kommen sie zwar mit gleicher lebendiger Kraft auf der Haut an, aber das von größerer Höhe kommende Gewicht muß doch stärker erregen wegen des schnelleren Eintretens der Deformation.

Der Ort der Deformation ist auch bei gleichbleibender Flächengröße des Reizes von Bedeutung, so zwar, daß ein und derselbe Reiz an verschiedenen Orten verschiedenen Effekt hervorbringen kann, teils weil die Empfindlichkeit der Endapparate wechselt, teils weil sie ungleich dicht stehen, so daß unter gleich großen Flächen die Endapparate in verschiedener Anzahl vorhanden sein können. Besondere Versuche haben gezeigt, daß die Erregung benachbarter Tastpunkte sich summiert, daß also Proportionalität zwischen Erregungseffekt und Zahl der gereizten Tastpunkte besteht. Was die Differenzen der Empfindlichkeit verschiedener Druckpunkte betrifft, so hat v. Frey[2]) mit seinen Reizhaaren als mittleren Schwellenwert von 303 untersuchten Punkten 1,28 g/mm (siehe unten über die Berechnung des Reizwertes der Reizhaare) als Minimum 0,5 g/mm, als Maximum 4 g/mm gefunden; ferner zeigte sich, daß die Druckpunkte aller Hautflächen merklich dieselbe, innerhalb der

Hautstelle	Dichte der Tastpunkte pro qcm	Mittlere Schwelle der Tastpunkte in g/mm	Häufigster Wert in g/mm	Min. Wert in g/mm	Max. Wert in g/mm
Handgelenk, Beugefläche	28,53	1,12	1	0,3	2,5
„ Dorsalfläche (Mitte)	28	1,2	1	0,3	3,5
„ Proc. styl. ulnae	20,5	1,42	1	0,4	3,5
„ radiale Fläche	25,75	1,44	1	0,5	3,5
Unterarm, Mitte der Beugefläche	16,08	1,24	1	0,5	3
„ oberer Teil der Beugefläche	9,33	1,42	1	0,75	4
Ellenbeuge	12,16	1,33	1	0,4	3
Oberarm, Mitte der Beugefläche	9,33 10,19	1,44	1	0,4	3
Fußrücken	23,75	1,27	1	0,4	2,5
Unterschenkel, Mitte d. Vorderfläche	5–5,6	2,16	2	0,75	5
„ Wade	5,8	1,45	1	0,4	3
Kniescheibe, Mitte	—	1,93	1,5	0,5	4
Oberschenkel, Vorderfläche üb. d. Knie	14,38	1,35	1	0,5	3
Brust	21,75	2,7	3	1	4
Rücken	26,25	4,3	4	2	7

[1]) Pflügers Arch. 82, 399, 1900. — [2]) Leipz. Abh. 1896, S. 235.

angegebenen Grenzen schwankende Empfindlichkeit besitzen. Kiesow[1]), der sehr ausgedehnte Untersuchungen über diese Sache anstellte, stellt seine Resultate in der vorstehenden Tabelle zusammen.

Die Bedeutung der Fläche. Man könnte vielleicht erwarten, daß bei sonst gleichen Verhältnissen der Reizerfolg einer mechanischen Einwirkung durch die auf die Flächeneinheit wirkende Kraft oder den Druck bestimmt würde, so daß z. B. mechanische Reize verschiedener Kraft, aber gleichen Druckes gleich empfunden würden. Dem ist indessen nicht so[2]), wenigstens nicht ohne Einschränkung. Nähere Untersuchungen haben ergeben, daß die zur eben merklichen Erregung der Druckpunkte der haarfreien Hautstellen nötigen Drücke (= auf der Flächeneinheit wirkende Belastung) je nach der Flächengröße des gereizten Hautareales andere Werte zeigen. Die Art der Abhängigkeit wird ersichtlich aus der Kurve (Fig. 117[3]) a. f. S.), auf deren Abszissenachse die Flächengrößen in Quadratmillimetern abzulesen sind und deren Ordinaten die Drücke in Einheiten von 0,1 Atm. (eine Atm. = 10 g/mm²) bedeuten. Der kleinste Druckwert findet sich danach bei einer Reizfläche von etwa 0,5 mm² (nur 0,036 Atm.). Bei kleinerer Fläche steigt der erforderliche Druck sehr schnell; nachdem also die Reizflächengröße diese Grenze passiert hat, darf man nicht etwa bei weiterer Verkleinerung derselben die darauf wirkende, zur eben merklichen Erregung des Druckpunktes nötige Belastung proportional vermindern, wie die folgende Tabelle, welche v. Frey und Kiesow[4]) durch Reizhaarversuche gewonnen, zeigt:

Kraft des Reizhaares (in g)	Fläche	Druckwert
0,125	0,05 mm²	0,25 Atm.
0,1023	0,033 „	0,31 „
0,09	0,025 „	0,36 „
0,08	0,02 „	0,4 „
0,056	0,01 „	0,56 „
0,04	0,005 „	0,8 „
0,0356	0,004 „	0,89 „
0,0309	0,003 „	1,03 „
0,0252	0,002 „	1,26 „
0,0178	0,001 „	1,78 „

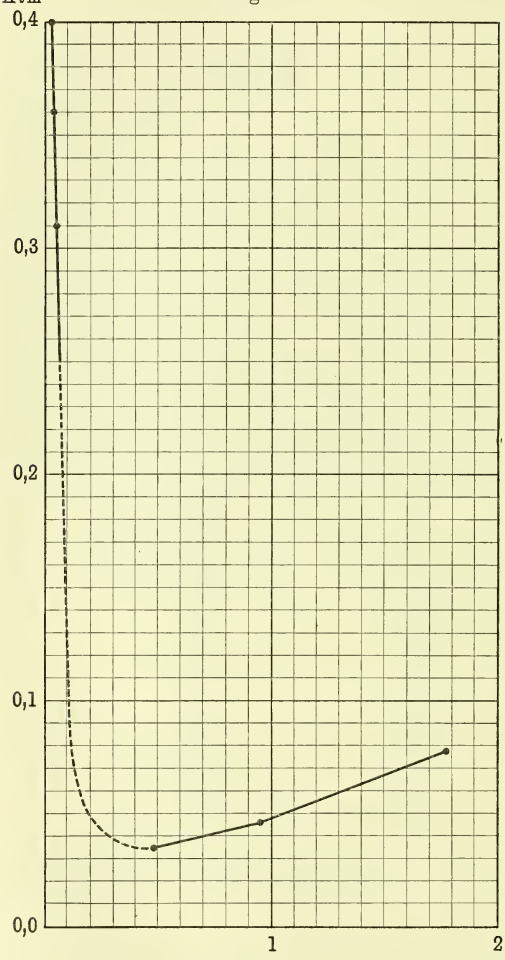
In der Nähe des Minimums ist der Schwellendruck nahezu konstant. Bei größerer Fläche steigt er langsam und liegt für Flächen von ungefähr 2000 mm² höher als 1 Atm.

Das Verhalten der Kurve läßt sich, wie eine Analyse von v. Frey und Kiesow gezeigt hat, sehr wohl aus der Annahme erklären, daß die Erregung des Tastorgans eine Funktion des an seinem Orte herrschenden Druckgefälles ist. Bei Vergrößerung der Fläche wird nämlich trotz gleich bleibenden Druckes das Druckgefälle um die Endorgane herum vermindert. Dasselbe erfolgt bei Verkleinerung der Fläche von einer gewissen Größe an, weil in

[1]) Wundts philos. Stud. **19**, 307, 1902. — [2]) Hierauf hat zuerst Nagel (Arch. f. d. ges. Physiol. **59**) gegenüber v. Frey hingewiesen. — [3]) v. Frey und Kiesow: a. a. O., S. 147. — [4]) A. a. O., S. 146. Die Ausrechnung der Kraft des Reizhaares fehlt jedoch in ihrer Tabelle.

diesem Falle das eigentliche Druckgefälle zwar steiler, aber oberflächlicher als die Endorgane abläuft. Die Tatsache, daß eine weitere Flächenverminderung unter die bezeichnete Minimalgrenze die zur eben merklichen Tastreizung nötige Belastung nicht proportional herabdrückt, hat auch, von einem von Nagel[1]) hervorgehobenen Gesichtspunkte aus betrachtet, Interesse. Wenn eine Spitze gegen die Haut gerichtet wird, trifft sie das Stratum corneum, welches sich einbuchtet. Man kann sich vorstellen, daß die jetzt gleichsam mit einem Überzug von Stratum corneum und noch tieferen Hautschichten versehene Spitze auf die umliegenden Schichten drückt. Dieser Überzug bewirkt dann, daß die Fläche, womit die Spitze auf die tieferen Partien drückt, größer als die wirkliche Spitzenfläche ist, und je spitziger die Nadel ist, desto größer ist die relative Flächenvermehrung, die von der Einbuchtung der oberflächlichsten Schichten abhängt, und desto kleiner wird die Bedeutung einer weiteren Verminderung der Spitzenfläche. Liegt die Spitzenfläche unter einer gewissen unteren Größe, so übt eine weitere Verminderung keinen Einfluß mehr auf die Größe der Fläche aus, über welche sich in den tieferen Hautschichten der Druck verteilt, da ja die Druckfalte der oberflächlichsten Hautschichten nicht unter ein bestimmtes Minimalmaß, welches von ihrer Dünnheit und Schmiegsamkeit abhängt, vermindert werden kann. Erst durch Anwendung dieser minimalen Spitzenflächen wäre es übrigens möglich, die kleinste Belastung festzustellen, welche überhaupt genügt, um eine minimale Druckempfindung auszulösen. Nach den v. Frey mitgeteilten Werten zu urteilen, scheint dieser Grenzwert der Spitzenfläche unter 0,001 mm² zu liegen. Wahrscheinlich wechselt er sehr, je nach der Hautbeschaffenheit.

Fig. 117.



[1]) Pflügers Arch. 59, 601 (1895).

Da also bei verschiedener Flächengröße Änderungen derselben nicht denselben Einfluß auf den Schwellendruck oder das Schwellengewicht ausüben, ist ein einfaches einheitliches Maß für den Reizwert verschiedener Flächen nicht möglich. Innerhalb gewisser Grenzen der Flächengröße ist immerhin nach v. Frey ein solches wohl anzunehmen, und zwar würde man dasselbe für Flächengrößen von 500 bis $^1/_{20}$ mm^2 dadurch erhalten, daß man die Kraft mit dem Diameter dividiert. Er nennt die so erhaltenen Einheiten (= 1 g/mm) Spannungseinheiten. Sein Haarästhesiometer und seine Reizhaare sind in dieser Weise zu eichen, sofern man sie zu Schwellenbestimmungen im Gebiete des Tastsinns benutzen will.

In intimem Zusammenhang mit der Bedeutung der Fläche bei Druckreizung steht die Deutung des sogenannten Meißnerschen Versuches.

Der Meißnersche Versuch. Meißner[1]) hat gefunden, daß, wenn wir unsere Hand in eine Flüssigkeit — Wasser oder Quecksilber von der Temperatur der Hand — eintauchen, an keinem Teile der untergetauchten Hautfläche eine Tastempfindung entsteht, wenn auch der Druck der auf ihr lastenden Flüssigkeitssäule sehr hoch gesteigert wird. Durch Änderungen des Meißnerschen Versuches haben v. Frey und Kiesow[2]) gezeigt, daß der Versuch nicht nur bei andauernd gleichem Druck der Flüssigkeit, sondern auch bei steilem Druckanstieg ebenso ausfällt. Die Erscheinung ist wahrscheinlich auf das Ausbleiben jeder Deformation der Tastfläche bei diesem Versuch zurückzuführen und kann vielleicht aus dem bei sehr großer, gleichförmig drückender Fläche wahrscheinlich nur kleinen Druckgefälle am Orte der Endorgane erklärt werden. Fraglich scheint indessen, ob nicht Quecksilber doch eine Deformation der Haut verursachen muß. Es schmiegt sich ja nicht nach der Hautfläche, muß also mehr an die Leisten der Haut als an die Furchen drücken, also doch Deformationen hervorrufen. Vielleicht werden die so entstehenden Druckempfindungen durch die weit intensivere, welche an der Grenzlinie entsteht, übertäubt.

Wie oben hervorgehoben, ist es nach v. Frey und Kiesow wahrscheinlich, daß die Erregung der Tastkörperchen eine Funktion des an ihrem Orte herrschenden Druckgefälles und dessen Änderungsgeschwindigkeit ist. Für die Vergleichung verschiedener Reize wäre es also sehr bequem, wenn man das Druckgefälle, welches sie hervorbringen, berechnen könnte. Das Druckgefälle im Inneren der Haut wird aber weiter in so verwickelter Weise von dem deformierenden Gewicht, der getroffenen Fläche, der Gestalt der Oberfläche, von der Dicke und Beschaffenheit der Haut, sowie der unterliegenden Gewebe beeinflußt, daß eine solche allgemeine Berechnung nicht möglich ist.

Was oben über die Abhängigkeit der Druckempfindungen von verschiedenen Faktoren gesagt wurde, bezieht sich, wo nicht anderes hervorgehoben, auf die Druckendorgane der haarfreien Hautpartien, also die Meißnerschen Tastkörperchen.

Die Nervenkränze der Haarscheiden — der andere zur Reaktion auf .Tasteindrücke oder, genauer gesagt, auf Deformationen bestimmte

[1]) Zeitschr. f. rat. Med., 3. Reihe, 7, 99 ff. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. d. Sinnesorg. 20, 144, 1899.

Apparat — zeigen indessen große Übereinstimmung mit den Meißnerschen Tastkörperchen. Auch sie werden durch ein in der Haut erzeugtes Druckgefälle erregt, und auch ihre Erregung nimmt innerhalb gewisser Grenzen mit diesem Gefälle zu. Einen gewissen Unterschied zeigen jedoch die funktionell gleichwertigen Apparate insofern, als die mit Tastkörperchen ausgestatteten Flächen bei etwas geringerer Empfindlichkeit sich durch große Ausdauer auszeichnen. Die Tastapparate der behaarten Hautflächen sind leichter ermüdbar, haben aber eine größere Empfindlichkeit. Namentlich werden gleitende Reize, Streichen mit einem weichen Pinsel oder einem Watteflöckchen, das Kriechen einer Fliege, ein Windhauch usw., welche an den eigentlichen Tastflächen wirkungslos sind, an den behaarten Körperstellen oft noch überraschend deutlich gefühlt.

Die Haare wirken dabei, wie zuerst Aubert und Kammler[1]) festgestellt haben, in zweifacher Weise erniedrigend auf die Reizschwelle. Wenn ein Gewicht auf die Hand niedergesetzt wird, bewirken die Haare eine Verminderung der Fläche, mit welcher das Gewicht die Haut berührt, wodurch der Druck des Gewichtes pro Flächeneinheit also vergrößert wird. Anderseits müssen sie auch, da sie meistens schief stehen, gegenüber aufgelegten Gewichten wie Hebel wirken. Nach dem Rasieren der Haare werden die Schwellen ausnahmslos höher. v. Frey[2]) hat eine Bestimmung des Schwellenwertes des Reizes bei Belastung eines Haares mit kleinen Gewichten gemacht und fand, daß an einem 8 mm langen Haar über dem Metacarpus indicis eine Belastung durch 0,4 mg meistens bemerkt wurde, wenn das Gewicht auf die Spitze des Haares gesetzt wurde. Da das Haar hierbei als Hebel funktioniert, ist die zur Nervenerregung eben genügende Einwirkung als ein Drehungsmoment auszudrücken, wobei der Durchtrittspunkt durch die Haut als Hypomochlion anzusehen ist. In dem erwähnten Falle betrug also die Reizschwelle 3,2 mg/mm.

Die Unterschiedsempfindlichkeit für Druckreize. Die ersten Untersuchungen über die Fähigkeit, Druckreize zu unterscheiden, rühren von E. H. Weber[3]) her, der auch sogleich die Bedingungen angegeben hat, deren Innehaltung notwendig ist, wenn man reine Versuchsergebnisse erhalten will. Man muß die Einmischung anderer Empfindungen, welche Belehrungen über die Größe der angewendeten Druckreize verschaffen können, ausschließen, also besonders die sogenannten Muskelempfindungen und in gewissen Fällen auch die Gesichtsempfindungen. Es ist um so wichtiger, daß bei Prüfung der Druckempfindungen die Muskelempfindungen ausgeschlossen sind, weil sie eine außerordentlich feine Unterschiedsempfindlichkeit besitzen und weil infolgedessen bei gleichzeitigem Funktionieren der Muskel- und Druckempfindungen die gefundene optimale Unterschiedsempfindlichkeit wahrscheinlich auf die Muskelempfindungen zu beziehen ist. Eine solche isolierte Prüfung der Unterscheidungsschärfe von Druckgrößen durch Druckempfindungen ist übrigens leicht erreichbar. Man muß ja nur die untersuchten

---

[1]) Untersuchungen über den Druck- und Raumsinn der Haut. Moleschotts Untersuchungen 5, 145. — [2]) Leipzig. Abh. 1896, S. 238. — [3]) Wagners Handwb. 3 (2), 544.

Körperteile völlig und sicher unterstützen. Auch Temperaturempfindungen sind auszuschließen durch geeignete Wahl der die Haut berührenden Stoffe.

Die Versuchsbedingungen können übrigens vielfach variiert werden. Weber hat zuerst die Untersuchungen in zweifacher Weise angestellt. Teils hat er verschiedene Gewichte bei gleichzeitiger oder nacheinander ausgeführter Belastung der beiden Hände, also verschiedene Hautstellen, verglichen. Teils hat er an einer und derselben Hautstelle nacheinander die zu vergleichenden Gewichte aufgesetzt. Es zeigte sich, daß bei diesem letzten Verfahren sicherere und feinere Resultate gewonnen wurden, daß wir also die Intensitäten zweier gleichzeitiger Druckempfindungen weniger genau vergleichend zu beurteilen vermögen als die Intensität einer reellen gegenwärtigen Empfindung mit derjenigen des Erinnerungsbildes einer voraufgegangenen Empfindung. Das Ausschlaggebende ist dabei nicht in dem Umstande zu suchen, daß in dem letzten Falle eine und dieselbe Hautstelle bei der Vergleichung angewendet wird, denn nach den Angaben Webers ist es auch bei Reizung verschiedener Hautstellen leichter, Gewichtsunterschiede bei nacheinander ausgeführter Belastung als bei gleichzeitiger wahrzunehmen.

Bei dieser Vergleichung der Intensitäten nacheinander folgender Empfindungen ist die Größe des Zeitintervalls zwischen beiden von wesentlichem Einfluß auf die Genauigkeit des Resultates, so zwar, daß mit der Zunahme desselben die Vergleichungsfähigkeit schwächer wird, verschieden bei verschiedenen Personen. Bei manchen wird die Vergleichung schon nach 10 Sekunden sehr unvollkommen. Um vergleichbare Resultate zu erhalten, muß also die Größe des Zeitintervalls in den verschiedenen Versuchen dieselbe sein. Dasselbe gilt natürlich auch für die Oberflächengrößen, mit denen die Gewichte die Haut berühren.

Die von Weber ausgeführten Beobachtungen über die eben merklichen Druckunterschiede sind wenig zahlreich. Er beschränkte sich darauf, die kleinsten Gewichtsdifferenzen zu bestimmen, welche einmal bei Belastung der Haut mit Loten [1]), das andere Mal mit Unzen [1]) erkannt werden konnten. Er fand in beiden Fällen dieselbe relative Differenz als Grenze der Unterschiedsempfindlichkeit. Dieses Resultat ergab sich aus Versuchen, in denen die Volarseite der letzten Fingerglieder als Tastfläche benutzt wurde, wobei sich die verglichenen Gewichte wie 29 : 30 verhielten; es wurden im günstigsten Falle eben noch die Gewichtsdifferenzen zwischen $14^1/_2$ Lot von 15 Lot und $14^1/_2$ Unzen von 15 Unzen erkannt. Dieser Wert ist als ein optimaler anzusehen, welcher nur von gewissen Personen an einzelnen bestimmten Hautstellen bei gespannter Aufmerksamkeit, also unter besonders günstigen Umständen erreicht wird.

Dies sind die Bestimmungen, welche die erste experimentelle Grundlage des sogenannten Weberschen Gesetzes bilden, welches hier nach G. E. Müller in der Weise formuliert werden mag, daß die relative Unterschiedsempfindlichkeit von der absoluten Reizstärke unabhängig ist.

Die folgenden Untersuchungen auf diesem Gebiete haben im allgemeinen den Zweck verfolgt, zu prüfen, ob und in welchem Grade und Umfange dem Weber-

[1]) Welche Werte in Gramm diese von Weber angewandten Gewichte repräsentieren, hat der Verf. nicht finden können.

schen Gesetz eine Gültigkeit zuzuerkennen ist. Die ersten diesbezüglichen Untersuchungen waren dem Weberschen Satze nicht günstig. Durch Dohrn[1]) wurde dessen Ungültigkeit für niedrige absolute Druckgrade behauptet; und auch die Untersuchungen von Biedermann und Löwit[2]) zeigten keine Übereinstimmung mit dem Weberschen Gesetze. Doch waren diese Untersuchungen wenig umfassend; Dohrn untersuchte nur bei einem Anfangsdruck von 1 g, von dem ausgehend der Druck so weit erniedrigt oder erhöht wurde, daß die Veränderung empfunden wurde. Bei den sonst sehr umfassenden Untersuchungen Biedermanns und Löwits fehlen gerade über die Versuche, in denen die Druckempfindungen von einer Einmischung von Muskelempfindungen isoliert wurden, die speziellen Mitteilungen; es wird nur kurz gesagt, daß sie dem Weberschen Gesetze ungünstig ausgefallen sind.

Sehr eingehende Untersuchungen, in denen der Einfluß der Geschwindigkeit der Druckänderungen berücksichtigt wurde, hat Stratton[3]) über die Unterschiedsempfindlichkeit für Druckreize veröffentlicht. Er suchte festzustellen, wie groß eine Intensitätsänderung sein mußte, um während des Verlaufs eines kontinuierlich einwirkenden Druckes überhaupt bemerkbar zu sein; das ist also eine Fragestellung ähnlich derjenigen Dohrns. Seine Methode erlaubte sowohl, dem ursprünglichen ein beliebiges Druckquantum plötzlich hinzuzufügen und davon zu entfernen, wie auch eine allmähliche Druckänderung mit jeder beliebigen Geschwindigkeit herbeizuführen. Untersucht wurde stets an der Volarfläche der kleinen Fingerbeere. Bei momentanen Druckänderungen wurden folgende Resultate erzielt: Die Schwelle für die Wahrnehmung momentaner Druckänderungen zeigt vier unterscheidbare Werte, je nachdem die Veränderung eine Zunahme oder eine Abnahme ist, und je nachdem nur die Veränderung oder auch die Richtung der Veränderung, also die Zu- oder Abnahme, wahrgenommen werden sollte. Unter sonst gleichen Bedingungen ist die Zunahme leichter wahrnehmbar als die Abnahme, ebenso die Erkennung der Veränderung überhaupt leichter als die Bestimmung der Richtung der Veränderung. Bei einem Anfangsdruck von 75 bis zu 200 g war für jede von diesen vier Schwellenarten die relative Unterschiedsschwelle annähernd konstant, also der Forderung des Weberschen Gesetzes entsprechend (die Zunahmeschwellen 0,024 und 0,034, die Abnahmeschwellen 0,039 und 0,055). Wenn dagegen der Anfangsdruck 10 bis 50 g war, wurde die relative Unterschiedsschwelle um so größer gefunden, je niedriger der Anfangsdruck war. Wenn die Druckänderung nicht momentan, sondern mit meßbarer Geschwindigkeit erfolgte, wirkt diese, wie schon Dohrn gefunden hatte, auf die Unterschiedsschwelle erhöhend, und je langsamer die Druckänderung war, desto größer wurde im allgemeinen die Unterschiedsschwelle, wobei jedoch die Schwellen bei sehr allmählich zunehmender Belastung für verschiedene Personen etwas differieren. Wenn verschiedene Anfangsdrucke, jeder von seiner ursprünglichen Größe ausgehend, in der Zeiteinheit um den gleichen Bruchteil der ursprünglichen Größe verändert werden, weichen die Schwellenwerte wenig von einem konstanten Werte ab. Wenn also bei einem Anfangsdruck von 10 g die Zunahme der Geschwindigkeit in einer Sekunde 0,1 dieses Wertes ist, also 1 g, und bei einem Anfangsdruck von 200 g die Geschwindigkeitsänderung in der Sekunde ebenso

[1]) Zeitschr. f. rat. Medizin **10**, 339, 1861. — [2]) Sitzungsber. d. Wien. Akad. **72**, 342, 1875. — [3]) Wundts Philos. Stud. **12**, 525, 1896.

ein Zehntel dieses Wertes, also 20 g ist, wurde die Veränderung merkbar, wenn das Verhältnis der Druckerhöhung zum Anfangswerte ungefähr 0,09 war. Das Webersche Gesetz scheint also hierbei annähernd gültig zu sein.

Übrigens sind die Resultate sehr von den Versuchsbedingungen abhängig, besonders wenn psychologische Faktoren in wechselnder Weise mitspielen, wie aus den Untersuchungen Seashores[1]), Halls und Motoras[2]) ersichtlich ist.

In keinem der hier erwähnten Versuche ist es übrigens sicher, daß immer nur dieselben Druckpunkte erregt worden sind, weshalb die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes eine noch offene Frage ist (v. Frey[3]).

Der zeitliche Ablauf der Druckempfindungen. Die Frage, wie eine Druckempfindung sich verhält von dem Augenblicke an, in dem der momentane oder andauernde Reiz die Haut trifft, bis zu ihrem endgültigen Verschwinden, wie sich also die Intensität der Empfindungen während ihres Bestehens ändert, ist noch nicht Gegenstand systematischer Untersuchungen gewesen. Einige Einzelheiten sind jedoch bekannt. Über die vom Eintreffen des Reizes bis zum Entstehen der Empfindung verfließende Zeit soll weiter unten in dem Kapitel über „Die Apperzeptionszeit der Hautempfindungen" gehandelt werden. Hier sei jedoch besonders hervorgehoben, daß die Druckempfindungen nach momentanem Reiz von äußerst kurzer Dauer sind. Die Reize können deshalb in sehr schneller Wiederholung appliziert werden, ohne daß die entsprechenden Empfindungen im Bewußtsein verschmelzen. In der Tat sollen in dieser Richtung die Druckempfindungen das kleinste wahrnehmbare Intervall unter allen Empfindungen zeigen. Doch wechseln hierüber die Zahlenangaben nur zu sehr.

Schwaner[4]) hat schwingende Stimmgabeln auf die Haut gesetzt und die Schwingungszahl bestimmt, bei welcher die Stimmgabel noch ein Gefühl des Schwirrens verursachte. Die benutzten Stimmgabeln hatten die Schwingungszahlen 13, 35, 66, 92, 122, 180, 246, 300, 375, 480, 570, 660, 800 und 1000. Wie die Versuche ergaben, zeigen die einzelnen Körperregionen ein verschiedenes Verhalten. So gelangten z. B. an der Dorsalfläche des Oberarmes schon 92 bis 480, in der Gegend der langen Rückenmuskeln schon 92 bis 375, an den Fingerspitzen aber erst 800 bis 1000 Schwingungen zur Verschmelzung, und die verschiedenen anderen Körperstellen schwankten zwischen diesen Extremen. Die Angaben von Sergi[5]) stehen mit diesen Werten in Übereinstimmung. Auch einige ältere Autoren haben bereits die außerordentlich entwickelte Fähigkeit der Drucknervenenden, kurze Intervalle zu perzipieren, beobachtet. So soll ein rotierendes Zahnrad, dessen Zacken gegen die Haut schlagen, noch keine einheitliche Empfindung geben, wenn die Zahl der Berührungen 480 bis 640 in der Sekunde beträgt, und die Vibrationen einer Saite sollen noch bei einer Frequenz von 1552 in der Sekunde einzeln wahrgenommen werden.

Es scheint demnach sicher zu sein, daß sehr häufig wiederkehrende Stöße (bis 1000 in der Sekunde) noch eine Empfindung des Schwirrens geben. Bei der Deutung dieser Tatsache wäre daran zu denken, daß ebenso viele, einander ganz ähnliche Erregungsprozesse sowohl in den Endorganen, als in den Nerven und in den Zentren pro Zeiteinheit ablaufen, daß also jeder

---

[1]) Stud. from the Yale Psychol. Laborat. **4** (1896). — [2]) Amer. Journ. of Psychol. **1**, 72, 1887. — [3]) Vorlesungen über Physiologie 1904, S. 319. — [4]) Die Prüfung der Hautsensibilität vermittelst Stimmgabeln, Diss., Marburg 1890. — [5]) Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane **3**, 179.

Reiz für sich empfunden wird. Eine solche Annahme ist zwar einfach, scheint aber allzu große Forderungen an die Reaktionsschnelligkeit der betreffenden Teile zu stellen und steht im Widerspruche mit dem einwandfreien Ergebnisse von v. Kries und Auerbach[1]), v. Vintschgau und Durig[2]), nach welchen die für die Unterscheidung zweier, an verschiedenen Hautstellen applizierter, sonst möglichst gleicher Reize erforderliche Zeit zwischen 0,021 und 0,036 Sekunden beträgt. Es liegen in der Literatur auch andere Angaben über ebenso niedrige Werte vor; so soll nach Bloch[3]) schon bei 40 bis 70 Schwingungen pro Sekunde eine Verschmelzung der Empfindungen erfolgen. Übrigens ist bei allen Versuchen an der Haut mit Stimmgabeln oder ähnlichen Apparaten die Möglichkeit zu berücksichtigen, daß das Gefühl von Zittern nicht durch die Haut, sondern durch tiefere Gewebe ausgelöst zu werden scheint. Nach Egger[4]) scheinen die Knochen (oder das Periost), durch Stimmgabelschwingungen erregt, mit deutlichen Empfindungen von Schwirren zu antworten. Jedenfalls ist die ganze Frage noch nicht vollständig spruchreif und ist einer weiteren Untersuchung wohl wert.

Während die Nervenfasern nur für schnelle Druckänderungen reizbar sind, zeigen die Endapparate des Drucksinnes die Eigentümlichkeit, daß sie von den auf der Körperhaut langsam anwachsenden, beziehungsweise andauernden Drucken wohl Empfindungen geben. Dabei sind jedoch die Größen der Reize von Bedeutung. An haarlosen Hautstellen haben v. Frey und Kiesow[5]) gefunden, daß Belastungen, welche nahe der Schwelle liegen, auch bei einer Dauer von 20 und mehr Sekunden nur vorübergehend empfunden werden. Bei allmählicher Reizverstärkung wird mit stets wachsender Deutlichkeit auch die Dauer der Belastung wahrgenommen, bei noch größerer Belastung auch die Entlastung. Bei sehr großen Belastungen wurde sodann eine weitere Schwelle erreicht, bei der die Entlastungen wiederum nicht erkannt wurden, indem die Druckempfindung trotz Wegnahme des Reizes noch eine gewisse Zeit andauerte. Die eigentlichen Tastflächen zeigen jedoch dieses Verhalten nicht oder nur spurenweise, während es an anderen Hautstellen wie auf der Dorsalseite der Hand und an den Fingern, auf dem Unterarm und auf der Stirn wohlausgeprägt gefunden wird. Auf dieser Tatsache beruht ein beliebter Vexierversuch. Drückt man einen harten flachen Gegenstand eine Zeitlang gegen die Stirn, so wird er, behutsam weggenommen, noch einige Zeit gefühlt, und man läßt sich leicht zu dem Versuch verleiten, den scheinbar anklebenden Gegenstand durch Stirnrunzeln zum Abfallen bringen zu wollen. Häufig spielen in solchen Versuchen auch nachdauernde Kälteempfindungen eine Rolle.

Diese nachdauernden Druckempfindungen werden von v. Frey auf die nach Druckreiz häufig nachdauernde Deformation der Haut, auf das sog. Druckbild bezogen, welches nur langsam ausgeglichen wird.

Anderseits werden Gegenstände, welche sehr lange eine druckempfindliche Stelle berührt haben, nicht dauernd gefühlt. Man merkt z. B. beinahe gar nicht die Kleider, welche der Haut anliegen, die Platte der falschen Zähne

[1]) du Bois-Reymonds Arch. 1877. — [2]) Pflügers Arch. **69**, 377, 1898. — [3]) Travaux de Laboratoire de Marcy **3** (1876/77); **4** (1878/79). — [4]) Journ. de Physiol. et de Pathol. 1899, p. 511. — [5]) v. Frey, Leipziger Abh. 1896, S. 183. Kiesow, Arch. ital. de Biol. **26**, 417, 1896.

und die Anwesenheit von Brillen oder Ringen. Die Ursache dieser Erscheinungen dürfte psychologischer Natur sein. Es ist ein Phänomen psychischer Adaptation, wenn andauernde Empfindungen, welche für das Individuum keine Bedeutung haben, aus dem Bewußtsein verdrängt werden. Mit dieser Erklärung steht die Beobachtung gut im Einklang, daß, wenn die Gegenstände, an deren Berührung eine Stelle gewöhnt ist, weggenommen werden, man häufig sehr lange eine deutliche Vorstellung des Nichtdaseins, des Fehlens des betreffenden Gegenstandes hat.

V. Die Kälte- und Wärmeempfindungen.

Obgleich die psychologische Analyse ohne weiteres zeigt, daß die Wärme- und Kälteempfindungen zwei ganz verschiedene Empfindungsarten sind, hat man doch erst spät erkannt, daß das Vermögen unserer Haut, Kälteempfindungen auszulösen, und ihre Fähigkeit, Wärmeempfindungen zu erzeugen, voneinander unabhängig variieren können und daß demnach die Existenz besonderer Kälte- und besonderer Wärmenerven angenommen werden muß.

Es wäre in der Tat nach der Entdeckung der gegenseitig unabhängigen Stellung der Wärme- und Kälteempfindungen möglich und in systematischer Hinsicht sicher richtig, der Physiologie der Kälte- und Wärmeempfindungen je ein besonderes Kapitel zu widmen; vielleicht wäre ein solches Verfahren auch nützlich, weil man nicht so leicht dazu verleitet wird, wie bei gemeinsamer Behandlung die Eigenschaften und Eigentümlichkeiten, welche für die Nerven und Empfindungen der einen Art gelten, ohne weiteres auf die der anderen zu beziehen. Da indessen die meisten Versuche auf diesem Gebiete vermehrtes Interesse durch den Vergleich gewinnen, sollen hier doch die Kälte- und Wärmeempfindungen untereinander vermischt behandelt werden.

Die Verbreitung der Kälte- und Wärmeempfindlichkeit. Kälte- und Wärmeempfindungen lassen sich an folgenden Körperteilen auslösen: an der ganzen äußeren Haut, an der Haut des äußeren Gehörganges, an den Schleimhäuten der Mund- und Rachenhöhle, des vorderen Einganges und des Bodens der Nasenhöhle und der oberen Fläche des Gaumenvorhanges, an der Schleimhaut des Afters (Weber, Hering[1]).

Die Temperaturempfindlichkeit der äußeren Haut ist ja durch die alltägliche Erfahrung über jeden Zweifel erhaben. Über die anderen Körperteile mögen die vorhandenen Angaben näher mitgeteilt werden.

Die ersten rühren von Weber her. Über die inneren Teile der Nase bemerkt Weber[2]): Zieht man bei großer Winterkälte mit Kraft sehr kalte Luft ein, so empfindet man die Kälte am Eingang der Nase, auf dem Boden derselben und auf der oberen Fläche des Gaumenvorhanges, nicht aber in den höheren Regionen. Ebenso empfindet man die Kälte eines kalten, runden, glatten Eisenstäbchens, das man in die Nase einbringt, nur am Eingange, nicht in den höheren Regionen. Auch nach Dessoir[3]) verursacht eine stark erwärmte, bzw. abgekühlte Sonde weder am Septum noch an der unteren Muschel Temperaturempfindungen. Sehr warme oder sehr kalte Getränke lösen nach Weber an der Zunge, dem

[1]) Weber in Wagners Handwb. 3, 481; Hering in Hermanns Handb. 3 (2), 415. — [2]) Wagners Handwb. 3 (2), S. 515. — [3]) du Bois-Reymonds Arch. 1892, S. 276.

Gaumen und im Schlunde die entsprechenden Empfindungen aus, weiter unten aber nicht. Bei Nachprüfung fand Dessoir, daß im Schlunde und dem Oesophagus Temperaturempfindungen bis etwa zur Stelle des Ringknorpels ausgelöst werden können. Was die Larynxschleimhaut betrifft, so vermitteln nach Pieniaczek[1]) und Dessoir die Epiglottis am Rande und an der vorderen und hinteren Fläche, der Sinus pyriformis, die Schleimhaut der Aryknorpel, der Stimm- und Taschenbänder und diejenige unterhalb der Glottis ausgeprägte Temperaturempfindungen. Das Zahnfleisch, aber nicht die Zahnpulpa, gibt auch Temperaturempfindungen (Dessoir u. v. Frey[2]). Die Cornea und Conjunctiva bulbi entbehren nach mehreren Beobachtern (v. Frey[3]), Nagel[4]) der Wärmeempfindungen, von Donaldson[5]) sind jedoch solche konstatiert (individuelle Verschiedenheiten?). Sicher dürfte das Vermögen, Wärmeempfindungen hier auszulösen, wenn überhaupt vorhanden, sehr selten sein, Kälteempfindungen können dagegen, wenigstens in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle, von der Conjunctiva bulbi und dem Randteil der Cornea ausgelöst werden, wenn nur angemessene Temperaturreize angewandt werden. Die Conjunctiva des unteren Lides verhält sich wie die Conjunctiva bulbi, ebenso die Plica semilunaris und die Caruncula. Die Umschlagsfalte zeigt eine auffallend hochgradige Kälteempfindlichkeit. Die Conjunctiva des oberen Lides scheint keine Temperaturempfindung zu geben (Nagel). Die Glans penis entbehrt nach einigen Angaben (Dessoir, Herzen[6]) der Temperaturempfindungen. Nach v. Frey kommt ihr jedoch eine ausgeprägte Kälteempfindlichkeit zu (individuelle Verschiedenheiten?). Die inneren Teile des Körpers, mit Ausnahme der hier erwähnten Schleimhäute, entbehren der Kälte- und Wärmeempfindlichkeit. Im besonderen ist dies durch Weber und in letzterer Zeit durch Lennander[7]) für die Bauchhöhle nachgewiesen.

Die teleologische Bedeutung der Temperaturempfindungen scheint darin zu liegen, daß sie Nachricht darüber geben, ob die Temperatur des äußeren Mediums angemessen ist oder nicht, und daß sie dadurch das Aufsuchen eines Aufenthaltsortes veranlassen, an dem die Temperaturverhältnisse günstige sind, oder überhaupt Maßregeln bewirken, durch welche in irgend einer Weise eine Anpassung an die bestehenden Temperaturverhältnisse erzielt wird. Sie sind auch vielleicht von Bedeutung für die Wärmeregulierung des Körpers. Doch liegen bisher keine Untersuchungen vor, ob sie reflektorisch Variationen in der Intensität der Verbrennungsprozesse, in der Blutverteilung und in der Tätigkeit der Schweißdrüsen hervorrufen können.

Der Gefühlston der Temperaturempfindungen ist wechselnd. Doch ist beinahe immer kräftige und ausgedehnte Kälteempfindung sehr unangenehm, während nicht zu intensive Wärmeempfindungen Wohlgefühl erregen. War der Körper zuvor hochgradiger Wärme ausgesetzt, so wirkt im allgemeinen eine nachherige Kälteempfindung angenehm, und umgekehrt scheint Wärme besonders wünschenswert, wenn die Körperoberfläche der Kälte lange ausgesetzt war.

Die Adaptationserscheinungen. Wenn ein die Haut berührender Gegenstand, dessen Temperatur an der Berührungsfläche während der Berührung konstant bleibt, keine Empfindungen von Kälte oder Wärme verursacht, ist die Hautstelle für diese Temperatur adaptiert. Um die Bedingung

---

[1]) Jahrb. d. Gesellsch. Wiener Ärzte 1878, S. 481 (zit. nach Dessoir a. a. O., S. 277). — [2]) Sächs. Ber. 1895, S. 179. — [3]) A. a. O., S. 166. — [4]) Pflügers Arch. **59**, 563. — [5]) Mind **10**, 399, 1885, zit. nach v. Frey, a. a. O. — [6]) Pflügers Arch. **38**, 102. — [7]) Mitteilungen aus den Grenzgebieten der Medizin und Chirurgie **10**, 38, 1902.

zu erfüllen, daß die Oberflächentemperatur während der Berührungszeit konstant bleibt, muß der Gegenstand gut wärmeleitend sein und eine große Wärmekapazität haben, was am besten dadurch erreicht wird, daß man ein Gefäß mit dünnem Metallboden anwendet und im Innern desselben einen genügend kräftigen Wasserstrom von konstanter Temperatur zirkulieren läßt. Die konstante Berührungstemperatur, welche weder kalt noch warm empfunden wird, mag als die Indifferenztemperatur bezeichnet werden. Man könnte auch anstatt dieses Ausdruckes von einer thermischen Indifferenzbreite (Leegaard[1]) sprechen, da die fragliche Temperatur — was ja eigentlich selbstverständlich ist — auch für eine und dieselbe Hautstelle in derselben Zeit nicht durch einen ganz bestimmten Punkt an der Thermometerskala repräsentiert wird, sondern in einer kleinen Strecke, welche in der Regel, wie Leegaard gezeigt hat, 0,5° C nicht übersteigt. Diese Indifferenztemperatur ist zu einer und derselben Zeit für verschiedene Hautstellen, aber auch für eine und dieselbe Hautstelle zu verschiedenen Zeiten verschieden.

Diese Tatsachen sind schon mit großer Wahrscheinlichkeit aus der alltäglichen Erfahrung zu erschließen. Obgleich die entblößten Teile der äußeren Haut einer niedrigeren Temperatur ausgesetzt sind als die bedeckten, fühlen wir meist in einem wohltemperierten Zimmer an keiner Stelle des Körpers Wärme oder Kälte. Und wenn wir einen Raum, in welchem wir keinerlei Temperaturempfindungen haben, mit einem etwas wärmeren vertauschen, so empfinden wir anfangs Wärme, nach längerem Aufenthalte aber im zweiten Raume kann jede Temperaturempfindung wieder verschwinden.

Noch besser ist die Verschiedenheit der Indifferenztemperaturen an verschiedenen Hautstellen und zu verschiedenen Zeiten durch besondere darauf gerichtete einwandfreie Versuche dargetan worden — Versuche, bei welchen zur Berührung Gegenstände von konstanter Berührungstemperatur angewendet wurden.

Hinsichtlich der Lage der Indifferenztemperatur hat Leegaard gefunden, daß sie gewöhnlich zwischen 28 bis 29° zu suchen ist. (Vielleicht sind jedoch diese Werte etwas zu niedrig.) Die Indifferenztemperaturen aller Teile der Hautoberfläche nähern sich diesem Mittelwert. Nichtsdestoweniger findet man deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Körperteilen. Es zeigt sich nämlich, daß die Indifferenztemperaturen auf den bedeckten und zentralen Teilen des Körpers ziemlich konstant sind, auf den unbedeckten und peripheren dagegen größere Schwankungen zeigen. Während die Indifferenztemperatur des Schenkels unter normalen Verhältnissen nicht niedriger als 28 und nicht höher als 30° gefunden wurde, ergab sich aus den Versuchen Leegaards, daß sie am Handrücken beinahe bis 23° herunter und bis über 33° hinaufgehen konnte. Sie umfaßte also hier einen Bereich von mehr als 10°. Diese Werte Leegaards sind jedoch noch keineswegs als Extreme anzusehen. Man kann z. B. die Finger für eine Temperatur von ungefähr 11° C adaptieren, so daß man eine deutliche Wärmeempfindung von einer konstanten Temperatur von 12° C erhält, und man kann sie für eine Temperatur von 39° adaptieren, so daß nur eine unbedeutende Erniedrigung eine Kälteempfindung verursacht (Thunberg[2]).

---

[1]) Deutsch. Arch. f. klin. Med. 48 (1891). — [2]) Upsala Läkaref. förh. 30 (1894/95).

Diese Angaben beziehen sich auf die Temperatur des die Haut berührenden Gegenstandes. Wie verhält sich aber dabei die Temperatur der Endorgane? Gehen deren Temperaturschwankungen mit denen der äußeren Temperatur parallel, so daß also auch für die Endorgane die Temperatur verschieden ist, bei welcher keine Temperaturempfindung ausgelöst wird? — (Diese Indifferenztemperatur der Endorgane mag nach Hering[1]) als der physiologische Nullpunkt bezeichnet werden.) — Die Frage ist noch nicht durch direkte Messungen der Temperatur der Endorgane gelöst worden, und es mögen deshalb zuerst die verschiedenen Möglichkeiten diskutiert werden. Entweder bleibt der physiologische Nullpunkt der Endorgane konstant bei wachsender Außentemperatur oder erfährt parallelgehende Änderungen. Gegen die erste Möglichkeit könnte man den Einwand erheben, daß man durch direkte Messungen der Temperatur einer gewissen Hautstelle gefunden hat, daß diese bei wechselnden äußeren Temperaturbedingungen, wenn keine Temperaturempfindung ausgelöst wird, doch verschieden temperiert ist, und daß also der physiologische Nullpunkt, in der hier angewandten Fassung also die Indifferenztemperatur der Endorgane, nicht konstant sein kann. In dieser Beweisführung fehlt jedoch ein notwendiges Glied, nämlich der Nachweis, daß die Temperatur der Endapparate wirklich die gleiche ist wie die, welche durch Messung der Temperatur der freien Hautfläche gefunden ist, oder daß sie wenigstens in derselben Richtung wie diese sich ändert. Daß dieses nicht sicher der Fall ist, geht aus folgender Überlegung hervor:

Da die Haut gewöhnlich von innen erwärmt und nach außen abgekühlt wird, müssen die verschiedenen Schichten eine um so niedrigere Temperatur haben, je näher der Oberfläche sie liegen. „Hauttemperatur" ist also ein nicht ganz korrekter Ausdruck; er kann jedoch angewendet werden, um den Wert zu bezeichnen, welchen man bei Messung der Temperatur der Hautoberfläche bekommt. Da indessen bei einer solchen Temperaturmessung meistens ein Temperaturausgleich stattfindet, ist der erhaltene Wert ein Durchschnittswert für die Hautschichten, welche an dem Temperaturausgleich teilnehmen. Die Annahme, daß man die Temperatur der thermischen Endorgane durch die eben erwähnte Temperaturmessung der Hautoberfläche bestimmt, wäre nur berechtigt, wenn ihre Temperatur in derselben Weise wie die so erhaltenen Werte geändert wurde, was nicht erwiesen ist. Wenn z. B. die Temperatur der Oberfläche durch die Berührung eines kalten Körpers gesunken ist, die tiefsten Hautschichten dagegen durch einen vermehrten Blutzufluß eine erhöhte Temperatur angenommen haben, so ist ein steileres Temperaturgefälle von innen nach außen eingetreten. Die tieferen Hautschichten haben also eine höhere Temperatur, die oberflächlicheren eine niedrigere angenommen, und dazwischen gibt es eine Schicht, die ihre Temperatur behalten hat. Da indessen die Lage der temperaturempfindlichen Endorgane zu dieser neutralen Schicht nicht bekannt ist, kann man nicht ohne weiteres schließen, daß die Temperatur der Endorgane niedriger ist, wenn man bei Messung der Oberflächentemperatur einen niedrigeren Wert abliest. Es wäre ja möglich, daß sie dieselbe Temperatur wie vorher haben, ja vielleicht eine noch höhere. Da übrigens die Kälte- und die Wärmeendorgane verschieden tief

[1]) Sitzungsber. d. Wien. Ak., 3. Abt., **75**, 108, 1877.

liegen dürften, können sie vielleicht ihre Temperatur in verschiedener Weise ändern.

Man könnte zwar gegen diese Überlegungen den Einwand geltend machen, daß die Gefäße der Haut bei niederer Lufttemperatur verengert werden, ein Vorgang, der bekanntlich für die Regulierung des Wärmeverlustes von großer Bedeutung ist. Dieser Satz dürfte nicht allgemein gültig sein. Es ist leicht zu beobachten, daß, wenn ein Finger in Wasser von z. B. 10^0 gehalten wird, eine deutliche Gefäßerweiterung entsteht. Die teleologische Erklärung dazu kann man darin sehen, daß die Hautgefäße auch die Aufgabe haben, die Haut gegen solche Temperaturänderungen zu schützen, welche ihrer Integrität schaden können.

Unter solchen Umständen wäre es also möglich, daß durch Variationen der Blutzufuhr zu der Haut dafür gesorgt wird, daß die Endapparate der Temperaturnerven trotz der Schwankungen der äußeren Temperatur innerhalb gewisser Grenzen, den Grenzen der Adaptation, allmählich zu derselben Temperatur zurückkehrten, so daß dadurch sich das allmähliche Verschwinden der Temperaturempfindungen erklären würde. Man kann indessen durch Versuche an anämischen Fingern leicht zeigen, daß sie trotzdem die Verschiebung des physiologischen Nullpunktes sehr deutlich zeigen (Thunberg[1]); da also die Anpassung auch bei künstlicher Blutleere zu beobachten ist, kann sie nicht durch Änderung der Blutzufuhr zu der Haut erklärt werden und muß durch die Eigenschaften der temperaturempfindlichen Endorgane bedingt sein.

Der adäquate Reiz. Die Frage, welches das adäquate Reizmittel für die Kälte- und Wärmeendorgane ist, ist zurzeit Gegenstand zweier Theorien, der von Weber[2]) und der von Hering[3]) (diejenige von Vierordt[4]) kann nicht mehr in Frage kommen).

E. H. Weber hat die Ansicht ausgesprochen, daß die Empfindungen der Wärme oder Kälte nur dann eintreten, wenn sich die Temperatur unserer Haut ändert, nicht aber dann, wenn sie auf einem bestimmten Grade verharrt. „Wenn", sagte er, „die unsere Haut umgebenden und berührenden Körper eine solche Temperatur haben, daß die Temperatur unserer Haut, ungeachtet wir selbst eine Wärmequelle in uns haben, weder steigt noch sinkt, so scheinen uns dieselben weder warm noch kalt, bringen sie die Temperatur der Haut zum Steigen, so scheinen sie uns warm zu sein, für kalt dagegen erklären wir sie, wenn durch ihren Einfluß die Temperatur unserer Haut sinkt." „Es scheint, als ob wir viel mehr den Akt des Steigens oder Sinkens der Temperatur unserer Haut als den Grad wahrnehmen konnten, bis zu welchem die Temperatur gestiegen oder gesunken ist." Nachdem das Vorhandensein besonderer Endapparate für Wärme- und für Kälteempfindungen entdeckt worden ist, ließe sich die Webersche Theorie dahin formulieren, daß die Wärmeendorgane durch Erhöhung ihrer Eigentemperatur, die Kälteendorgane durch Erniedrigung der ihrigen erregt werden.

---

[1]) Upsala Läkaref. förh. 30 (1894/95). — [2]) Wagners Handwb. 3, 2. Abteil., 549. — [3]) Sitzungsber. d. Wiener Akad., 3. Abteil., 75, 101, 1877. — [4]) Grundriß d. Physiol., 5. Aufl., 1877, S. 355.

Es gibt eine Menge hierhergehöriger Erscheinungen, welche sich unter diesen Gesichtspunkten zusammenfassen lassen.

Da ja die Haut normalerweise von innen her erwärmt und nach außen abgekühlt wird, müssen die Temperaturen der verschiedenen Schichten und also auch der in ihnen liegenden Endorgane durch die jeweilige Größe dieser zwei Faktoren, der Erwärmung von innen und der Abkühlung nach außen bestimmt sein. Eine Änderung der Eigentemperatur der Endorgane wird eintreten müssen, sobald eine Störung des bis dahin vorhanden gewesenen Gleichgewichtes zwischen Zufuhr und Abfuhr der Wärme eintritt, und zwar wird eine Steigerung jener Eigentemperatur erfolgen, wenn sich die Abfuhr mindert, während die Zufuhr konstant bleibt, oder wenn sich die Zufuhr steigert, während die Abfuhr unverändert bleibt, oder wenn beide sich steigern, aber die Zufuhr mehr als die Abfuhr, oder endlich, wenn sich beide verringern, aber die Abfuhr weniger als die Zufuhr. In ganz analoger Weise sind vier verschiedene Ursachen für ein Sinken der Eigentemperatur der Endorgane denkbar.

Wie die Erfahrung und das Experiment gezeigt hat, entsteht nun eine Wärmeempfindung, in welcher Weise auch die Eigentemperatur der Wärmeendorgane erhöht wird, eine Kälteempfindung, in welcher Weise auch die Temperatur der Kälteendorgane zum Sinken gebracht wird. Unter diesen Umständen ist die Vierordtsche Ansicht, daß die Richtung des Wärmestromes die Art der Empfindung bestimmt, nicht haltbar, wie Hering hervorgehoben hat. Dagegen steht dies Auftreten der Temperaturempfindungen in bester Übereinstimmung mit der Weberschen Theorie. Auch die Tatsache, daß innerhalb gewisser Grenzen der äußeren Temperatur die zuerst vorhandenen Temperaturempfindungen allmählich verschwinden, läßt sich nach Webers Theorie deuten. Für jede konstant bleibende Größe der Wärmeaufnahme und -abgabe der Haut bildet sich allmählich ein neuer Gleichgewichtszustand für die Endorgane aus; ist dieser eingetreten, die Temperatur also konstant, so ist auch die Temperaturempfindung verschwunden.

Es erhob sich aber bald die Frage, ob die Theorie Webers zureichend ist.

Weber führt selbst einen Versuch an, welcher dieser Ansicht zu widersprechen scheint. „Wenn man", sagt er, „einen Teil der Haut des Gesichts, z. B. der Stirn, mit einem + 2° R kalten Metall einige Zeit, z. B. 30 Sekunden, in Berührung bringt und denselben dann entfernt, so fühlt man ungefähr 21 Sekunden lang die Kälte an jenem Teile der Haut." Nach dem, was soeben mitgeteilt worden, hätte man glauben sollen, wir würden das Gefühl der Wärme haben, während ein erkalteter Teil der Haut wieder erwärmt wird. Weber vermutet daher, daß in diesem letzteren Falle das Gefühl der Kälte nicht dadurch entsteht, daß die Nerven des gekühlten Hautstückes, sondern daß die Nerven der angrenzenden Haut, der nun von der Haut Kälte mitgeteilt wird, die Empfindung der Kälte hervorbringen.

Hering hat indessen hervorgehoben, daß, wenn Webers Theorie richtig wäre, infolge der relativ bedeutenden Temperatursteigerung des mit dem Metalle in Berührung gewesenen Hautstückes eine Wärmeempfindung an diesem entstehen müßte. Aber eine solche bemerkt man nicht.

Bei dieser Sachlage und im Hinblick auf die Tatsache, daß wir, wie schon Fechner[1]) und Vierordt bemerkt haben, anhaltende Temperatur-

[1]) Elemente der Psychophysik, Leipzig 1860, S. 201.

empfindungen haben können, hat Hering die Ansicht ausgesprochen, daß nicht nur die im Endorgan vor sich gehende Temperaturänderung reizend wirkt, sondern auch die absolute Temperatur. Seine Theorie hat Hering in folgender Weise ausgeführt.

Wenn ich an irgend einer Hautstelle weder Wärme noch Kälte empfinde, kann man die Eigentemperatur der nervösen Apparate als die physiologische Nullpunktstemperatur bezeichnen. Jede Eigentemperatur des nervösen Apparates, welche über der physiologischen Nullpunktstemperatur liegt, wird als Wärme, jede unter der Nullpunktstemperatur liegende als Kühle oder Kälte empfunden. Die Deutlichkeit der Wärme- oder Kälteempfindung wächst unter sonst gleichen Umständen mit dem Abstande der jeweiligen Eigentemperatur von der Nullpunktstemperatur. Die physiologische Nullpunktstemperatur ist an derselben Hautstelle innerhalb gewisser Grenzen variabel, und verschiedene Hautstellen haben überdies verschiedene mittlere Nullpunktstemperaturen. Jede als warm empfundene Eigentemperatur des nervösen Apparates bedingt eine Verschiebung des Nullpunkts nach oben, jede als kalt empfundene eine Verschiebung nach unten. Bei sehr langer Konstanz einer als warm oder kalt empfundenen und von der ursprünglichen Nullpunktstemperatur nicht zu stark abweichenden Eigentemperatur kann schließlich die Verschiebung des Nullpunktes so erheblich werden, daß er mit jener Eigentemperatur zusammenfällt.

Hering nahm bei der Aufstellung seiner Theorie an, daß die Wärme- und Kälteempfindungen von demselben nervösen Apparate vermittelt werden. Nach der Entdeckung der Kälte- und Wärmepunkte muß ja dieser Teil der Heringschen Theorie fallen. Der wesentliche Inhalt derselben, nämlich die Ansicht, daß Temperaturempfindungen auch bei konstanter Temperatur der Endorgane ausgelöst werden, und daß der physiologische Nullpunkt sich allmählich in der Richtung der einwirkenden Temperatur verschiebt, ist jedoch mit diesem Teil nicht so fest verbunden, daß sie nicht trotzdem beibehalten werden könnte; die Theorie ist denn auch von den meisten Forschern mit Vorbehalt der nötigen Modifikationen als wahrscheinlich richtig angenommen. Eine Analyse der beiden Temperatursinnestheorien und ihrer Konsequenzen und ein Vergleich mit den Tatsachen zeigt indessen, daß diese allgemein verbreiteten theoretischen Ansichten nicht genügend begründet sind.

Nach Weber soll eine Temperaturempfindung nur so lange dauern, als die Temperaturänderung in der Schicht der Endorgane vor sich geht, nach Hering nicht nur während dieser Zeit, sondern auch nachdem die Endorgane in das neue stationäre Temperaturstadium eingetreten sind, und zwar so lange, bis der physiologische Nullpunkt durch eine langsam sich vollziehende Verschiebung die neue Temperatur der Endorgane erreicht hat. — Nach Hering hätten also die Temperaturempfindungen bei konstantem Reiz bedeutend längere Dauer als nach Weber. Durch eine Untersuchung dieser Dauer hat Holm[1]) zu entscheiden versucht, welche der beiden Theorien die richtige ist. Es zeigte sich dabei, daß die Dauer der Temperaturempfindungen recht kurz ist, wenn man nur eine Verbreitung des Reizes zu immer neuen Endorganen verhindert. Die Dauer der von der Bauchhaut ausgelösten Kälteempfindungen bei Reizung mit einer konstant temperierten Metallfläche ist aus folgender Tabelle ersichtlich. Unter *A* ist die applizierte Temperatur angegeben, unter *B* die Durchschnitte aus den erhaltenen Einzelwerten der Zeitdauer in Sekunden:

[1]) Skand. Arch. f. Physiol. **14**, 242, 1903.

A	B	A	B	A	B
30°	31	20°	72	10°	165
25°	47	15°	112	5°	210

Die Dauer der Wärmeempfindungen zeigt die folgende Tabelle:

A	B
40°	126
45°	152

Holm deutet diese Ergebnisse zugunsten der Weberschen Theorie. Es ist zwar nicht direkt bewiesen worden, daß die Temperaturempfindungen nur so lange andauern wie die Temperaturänderung, aber die Zahlen zeigen doch, daß die Dauer der Empfindung in einer Größenordnung gefunden wird, die eine Übereinstimmung mit der Zeitdauer der Temperaturänderung wahrscheinlich macht. Diese letztere darf jedenfalls nicht allzu gering veranschlagt werden, da ja die Epidermis ein besonders schlechter Wärmeleiter ist und die Temperaturausgleichung durch sie hindurch sehr langsam ablaufen muß. Übrigens wird die Richtigkeit der Weberschen Theorie nicht dadurch widerlegt, daß bisweilen besonders lange dauernde Temperaturempfindungen erhalten werden können. Webers Theorie verlangt im Gegenteil, daß, wenn die Temperaturänderung in der Schicht der Endorgane längere Zeit andauert, die Sensation ebenso lange andauern muß. Endlich hat Holm[1]) die nach Wegnehmen des Reizmittels zurückbleibenden Temperaturempfindungen einer Analyse unterworfen; war doch das Fortdauern der Kälteempfindung nach Aufhören des Reizes als entscheidender Beweis zugunsten der Heringschen Theorie herangezogen worden. Zwar zeigte sich die Webersche Erklärung ungenügend, da zurückbleibende Temperaturempfindungen auch dann beobachtet wurden, wenn eine Verbreitung des Reizes auf die umliegenden Hautteile verhindert war. Die Temperaturempfindungen blieben aber doch nur unter zwei Umständen zurück: Erstens wenn ein starker Temperaturreiz sehr kurz eingewirkt hatte. In diesem Falle kann das Überdauern der Temperaturempfindung, wie schon Hering hervorgehoben hat, sehr wohl nach Webers Theorie erklärt werden. Während der schnellen Berührung mit einem warmen Gegenstande werden nur die oberflächlichen Schichten der Haut erwärmt, und bei der darauf folgenden Temperaturausgleichung fährt die Temperatur in den Wärmeendorganen fort, während der Zeit der Nachsensation zu steigen. In ähnlicher Weise sind die nach sehr kurzer Kältereizung zurückbleibenden Kälteempfindungen zu erklären. Zweitens entstehen nach intensiven, lange dauernden Kältereizen zurückbleibende Kälteempfindungen, und diese sind dadurch gekennzeichnet, daß sie erst nach einer kleinen Pause nach der Wegnahme des Reizes auftreten. Wahrscheinlich liegen hier nach Alrutz[2]) und Holm paradoxe Kälteempfindungen (siehe unten) vor, welche durch eine vom Blut bewirkte schnelle Erwärmung der vorher niedrig temperierten Kälteendorgane verursacht sind.

Während also die Ergebnisse der Untersuchungen über zurückbleibende Temperatursensationen der Weberschen Theorie nicht widersprechen, sprechen sie entschieden gegen die Heringsche. Durch Holms Versuche ist nämlich erwiesen, daß zurückbleibende Kälteempfindungen nur bei sehr intensiven Reizen entstehen. Reize mittlerer Intensität, welche doch sehr deutliche Kälteempfindungen hervorrufen, geben keine nachdauernde Empfindung. Da aber nach Hering die absolute Temperatur der Endorgane reizend wirkt, so wäre man berechtigt, auch bei schwächerer Reizung zurückbleibende Kältesensationen zu erwarten. Die Lehre von der Verschiebbarkeit des physiologischen Nullpunktes kann hierbei zugunsten der Heringschen Theorie kaum herangezogen werden, denn wenn der Nullpunkt genau so schnell verschoben wird, wie die Temperaturänderung vor sich geht, würde ja Herings Theorie mit der Webers zusammenfallen.

---

[1]) Skand. Arch. f. Physiol., S. 249, 1903. — [2]) Undersökningar öfver smärtsinnet, Upsala 1901, S. 113.

Da die Schwierigkeiten, welche die andauernden und die zurückbleibenden Temperaturempfindungen für die Theorie Webers ausmachten, als beseitigt angesehen werden können, während Herings Theorie dabei auf immer größere Hindernisse stößt, dürfte vorläufig Webers Theorie als die zurzeit wahrscheinlichste zu betrachten sein. Die Frage kann aber nicht als entschieden angesehen werden, ehe nicht die physikalischen Konstanten für die äußeren Hautschichten so weit bekannt sind, daß die Wärmeausgleichung in der Haut quantitativ berechnet werden kann.

Stellt man sich also auf den Boden der Weberschen Theorie, so fragt sich jetzt, was die Stärke der Temperaturempfindung bestimmt. Wenn auch dieses Problem noch nicht eingehend behandelt ist, kann man doch mit ziemlicher Sicherheit vermuten, daß die Intensität von der Geschwindigkeit der Änderung der Eigentemperatur der Endorgane vor allem bedingt ist, und daß demnach die Bedingung für eine Temperaturempfindung dahin präzisiert werden kann, daß die Endorgane in der Zeiteinheit von einer Temperaturänderung betroffen werden müssen, welche eine gewisse noch nicht bestimmte Größe hat.

Jedoch auch die Temperatur der Endorgane scheint, ohne als eigentlicher Reiz in Betracht zu kommen, von Bedeutung für den Reizerfolg zu sein, indem ein Reiz, der eine Temperaturänderung von derselben Geschwindigkeit bewirken würde, wirksamer sein dürfte, wenn die von dem Reize getroffenen Endorgane ihre mittlere Temperatur haben, als wenn sie durch einen vorherigen Temperaturreiz erwärmt oder erkältet sind. Inwieweit dies durch Ermüdungserscheinungen oder durch die von der Temperaturlage bewirkten Erregbarkeitsänderungen beeinflußt wird, ist noch nicht genügend bekannt. Nach Goldscheider [1]), der die Bedeutung dieser Dinge zuerst hervorgehoben hat, entfaltet ein Temperaturreiz folgende für neue Reize bedeutungsvolle Einwirkungen auf die Temperaturnerven: 1. Er verändert die Temperatur der Haut und damit die Größe der Wärmeaufnahme oder -abgabe gegenüber den späteren Reizen. 2. Er schafft in den gleichsinnigen Nerven einen Erregungszustand, welcher zugleich mit der Nachdauer der ihm selbst zugeordneten Empfindung die Reizempfänglichkeit derselben herabsetzt. 3. Er verändert mit der Hauttemperatur überhaupt auch speziell diejenige des nervösen Apparates und setzt, wahrscheinlich in gleichsinniger Weise, die Empfindlichkeit sowohl der gleichsinnigen wie ungleichsinnigen Nerven herab. Durch eine Temperaturänderung werden also die ungleichsinnigen Nerven durch eine Ursache in ihrer Erregbarkeit abgestumpft, während für die gleichsinnigen mehrere Faktoren eine komplexe Wirkung zeitigen. Über andere Faktoren, die hier mit ins Spiel kommen, aber nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Wirkungsweise der Endorgane stehen, siehe unten S. 679 ff.

Wenn auch nach dem Gesagten die Webersche Theorie zurzeit als die wahrscheinlichste anzuerkennen ist, muß sie doch in der Weise erweitert werden, daß die Kälteendorgane nicht nur durch Temperatursenkung erregt werden, sondern auch durch eine genügend kräftige und schnelle Temperaturerhöhung, wie die paradoxen Kälteempfindungen zeigen. Möglicherweise werden auch die Wärmeendorgane nicht nur durch Temperaturerhöhung,

[1]) Ges. Abh. 1, 145.

sondern auch durch sehr intensive Temperatursenkung erregt, wofür die paradoxen Wärmeempfindungen zu sprechen scheinen.

Die paradoxen Temperaturempfindungen. Strümpell[1]) hat zuerst festgestellt, daß Nervenkranke, wenn Kälteanästhesie vorhanden ist, nicht selten angeben, beim Berühren der Haut mit Eisstückchen eine deutliche Wärmeempfindung zu haben. Sehr viel seltener ist nach seinen Beobachtungen die umgekehrte Erscheinung, daß nämlich Wärmereize eine deutliche Kälteempfindung hervorrufen. Strümpell deutet diese Erscheinungen dahin, daß die Wärmenerven durch den stärkeren Kältereiz in Erregung versetzt werden, und daß in analoger Weise die Kältenerven durch den stärkeren Wärmereiz erregt werden. Von physiologischem Interesse sind diese Beobachtungen Strümpells geworden, nachdem von Lehmann[2]) und v. Frey[3]) konstatiert worden war, daß Kältepunkte mit einer Kälteempfindung auch bei Reizung mit erwärmten Spitzen reagieren. Die in dieser Weise entstehenden Kälteempfindungen werden nach v. Frey als „paradoxe" bezeichnet. Die Richtigkeit dieser Angaben ist nachher von mehreren Forschern bestätigt worden (Alrutz[4]), Kiesow[5]), Thunberg[6]), Veress[7]), Bader[8]), und als Resultat dieser Untersuchungen hat sich ergeben, daß die Fähigkeit, durch Wärmereize erregbar zu sein, nicht eine Eigenschaft nur weniger Kältepunkte ist, sondern allen Kältepunkten zukommt. Wenn man flächenförmige Wärmereizung anwendet, werden bei genügender Reizintensität auch die Kältepunkte mit erregt. Die zur selben Zeit entstehenden Wärmeempfindungen übertäuben aber die Kälteempfindung, so daß es schwierig ist, dieselbe wahrzunehmen. Durch zweckmäßige Änderung des Wärmebestandes der Haut und durch besonders abgepaßte Reizmittel kann man aber auch bei flächenförmiger Reizung die paradoxen Kälteempfindungen isoliert von der Wärmeempfindung hervorrufen. Die betreffenden Versuche fußen in erster Linie auf der Tatsache, daß die Kältenerven durchschnittlich oberflächlicher als die Wärmenerven enden[9]). Auch wenn man beinahe oder ganz wärmepunktfreie Gebiete mit genügend intensiver Wärme reizt, bekommt man isolierte Kälteempfindungen (Alrutz). So dürfte auch die von Nagel[10]) gefundene Kälteempfindung, welche von der Cornea und Conjunctiva ausgelöst wird, wenn ein Strom heißer Luft dagegen geleitet wird, zu erklären sein.

Bei den paradoxen Kälteempfindungen liegt zwar die Vermutung nahe, daß nicht das Endorgan, sondern der Nervenfaden durch die Wärme als allgemeines Nervenreizmittel gereizt wird; daß aber doch in Wirklichkeit das Kälteendorgan durch das Wärmereizmittel affiziert wird, geht aus folgendem hervor. Erstens wird dies durch die Tatsache bewiesen, daß bei zweckdienlicher Versuchsanordnung eine von jeder Schmerzempfindung freie Kältesensation bei Wärmereizung erhalten werden kann. Da nämlich die Schmerznerven oberflächlicher als die Kältenerven endigen, und da kein Grund zu der Annahme vorliegt, daß diese letzteren eine spezifische Reizbarkeit für hohe Temperaturen oder erstere eine solche für geringere besitzen, so müßte ein auf die Hautfläche applizierter Reiz, der ja immer kräftiger auf die oberflächlicheren Schichten wirkt, auch und in noch höherem Grade die Schmerznerven reizen, wenn er überhaupt als allgemeines Reizmittel wirkt. Da aber die dadurch hervorgerufene Kältesensation durchaus von Schmerz frei sein kann, muß man schließen, daß nicht der Nerv, sondern das Kälteendorgan gereizt ist. Eine weitere Stütze für diese Ansicht liefert die Tatsache, daß die paradoxen Kälteempfindungen unter Umständen durch so niedrige Temperaturen ausgelöst werden, daß diese nicht als allgemeine Nervenreizmittel wirken können. An normal temperierter Haut erhält man zwar bei punktförmiger Reizung die paradoxen Kälteempfindungen nach v. Frey erst bei wenigstens 45°, ausnahmsweise schon bei

---

[1]) Deutsch. Arch. f. klin. Med. **28** (1881). — [2]) Die Hauptgesetze des menschlichen Gefühlslebens 1892, S. 35. — [3]) Leipziger Ber. 1895, S. 172. — [4]) Skand. Arch. **7**, 333, 1897. — [5]) Wundts philos. Studien **14**, 586, 1898. — [6]) Skand. Arch. **11**, 391, 1901. — [7]) Pflügers Arch. **89**, 33, 1902. — [8]) Wundts philos. Studien **18**, 452, 1903. — [9]) Über die dabei anzuwendenden Methoden siehe Thunberg, a. a. O. — [10]) Pflügers Arch. **59**, 586, 1895.

40°. Und um wirklich deutliche Kälteempfindungen zu erhalten, sind höhere Temperaturen — 50° und darüber — nötig. Wenn dagegen eine Hautstelle vorher abgekühlt ist, z. B. dadurch, daß sie in Berührung mit einem Gegenstande mit konstanter 10 gradiger Oberflächentemperatur gewesen ist, erhält man die paradoxe Kältesensation schon [1]) durch einen 35 gradigen, ja vielleicht noch etwas darunter liegenden Reiz. Unter solchen Umständen ist es möglich, daß die nach Wegnehmen des Kältereizes durch die Blutzirkulation bewirkte Erwärmung die Kälteendorgane paradox erregen kann, eine Beobachtung, welche, wie erwähnt, zu der Erklärung der nachdauernden Kälteempfindungen verwertet worden ist (Alrutz[2]), Holm[3]).

Ob es auch eine paradoxe, also eine durch Kältereizung der Wärmenerven entstehende Wärmesensation gibt, ist noch nicht sicher entschieden. Die Unsicherheit hat sicher zum Teil ihren Grund in der größeren Tiefe, in welcher die Wärmenerven im allgemeinen enden, und in der dadurch bedingten Schwierigkeit, die Wärmenerven mit intensiven Kältereizmitteln isoliert zu reizen. Wenn dabei Kälteempfindungen entstehen, dürften die eventuellen schwachen Wärmeempfindungen leicht übertäubt werden. Gegen die Möglichkeit solch paradoxer Reizbarkeit der Wärmenerven spricht zwar, daß weder Lehmann noch Alrutz noch Kiesow paradoxe Wärmeempfindungen erzielen konnten, obgleich sehr intensive Kältereizmittel (bis — 70°) zur Anwendung kamen. Anderseits sind aber für eine solche paradoxe Reizbarkeit die unter pathologischen Verhältnissen beobachteten „perversen Wärmeempfindungen" ins Feld zu führen. Die einfachste Erklärung der von Strümpell beschriebenen perversen Temperaturempfindungen ist, daß sie die bei Wegfall der vorherrschenden Temperaturempfindungen deutlich hervortretenden paradoxen Empfindungen sind. Wenn also bei Lähmung der Wärmenervenenden ein heißer Gegenstand als kalt empfunden wird, rührt dies nur davon her, daß die paradoxe Kälteempfindung jetzt isoliert hervortritt und nicht durch die unter normalen Verhältnissen zur selben Zeit entstehende kräftige Wärmeempfindung übertäubt wird. Da Strümpell und andere Forscher beschreiben, daß, wenn Kälteanästhesie vorhanden ist, Eis als warm empfunden wird, so liegt die Deutung nahe, daß die Wärmenerven wirklich durch Kälte reizbar sind, und daß die so entstandene Wärmeempfindung durch die Lähmung der Kältenerven nur isoliert hervorgetreten ist. Indessen liegen, wie Alrutz hervorgehoben hat, mehrere Verwechslungsmöglichkeiten vor.

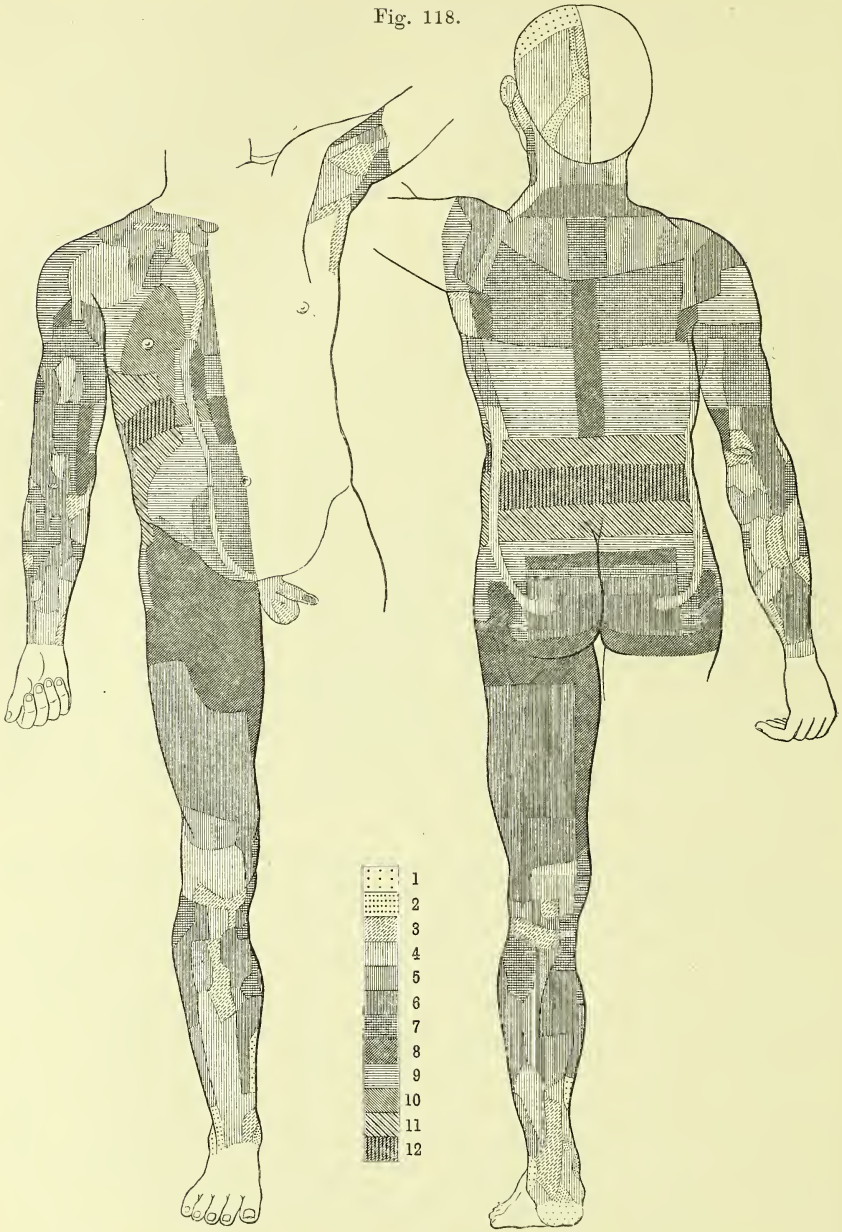
Die Abhängigkeit der Temperaturempfindungen, besonders ihres Schwellenwertes, von verschiedenen Faktoren. Da die temperaturempfindlichen Endorgane in der Haut eingebettet liegen, und da die Haut wenigstens nicht in nennenswertem Grade für strahlende Wärme durchgängig ist, werden die Endorgane unmittelbar durch die in der Haut vor sich gehenden Temperaturänderungen gereizt. Wenn wir jetzt die verschiedenen auf die Intensität der Temperaturempfindungen einwirkenden Variablen näher analysieren, dürfte es angemessen sein, zuerst die Bedeutung der verschiedenen von der Haut abhängigen Faktoren zu behandeln, und sodann auf den Einfluß verschieden angeordneter äußerer Reize überzugehen. Was die erstgenannten Faktoren betrifft, so hat sich für die Intensität der Temperaturempfindung die Eigentemperatur der Haut und der Ort und die Größe der gereizten Hautfläche als von Bedeutung erwiesen:

Welche Rolle der Eigentemperatur der Haut zukommt, und wie sie von den verschiedenen Theorien aufgefaßt wird, ist schon oben des näheren besprochen worden.

---

[1]) Thunberg, Skand. Arch. f. Physiol. **11**, 418, 1901. — [2]) Smärtsinnet, Upsala 1901, S. 113. — [3]) Skand. Arch. f. Physiol. **14**, 256, 1903.

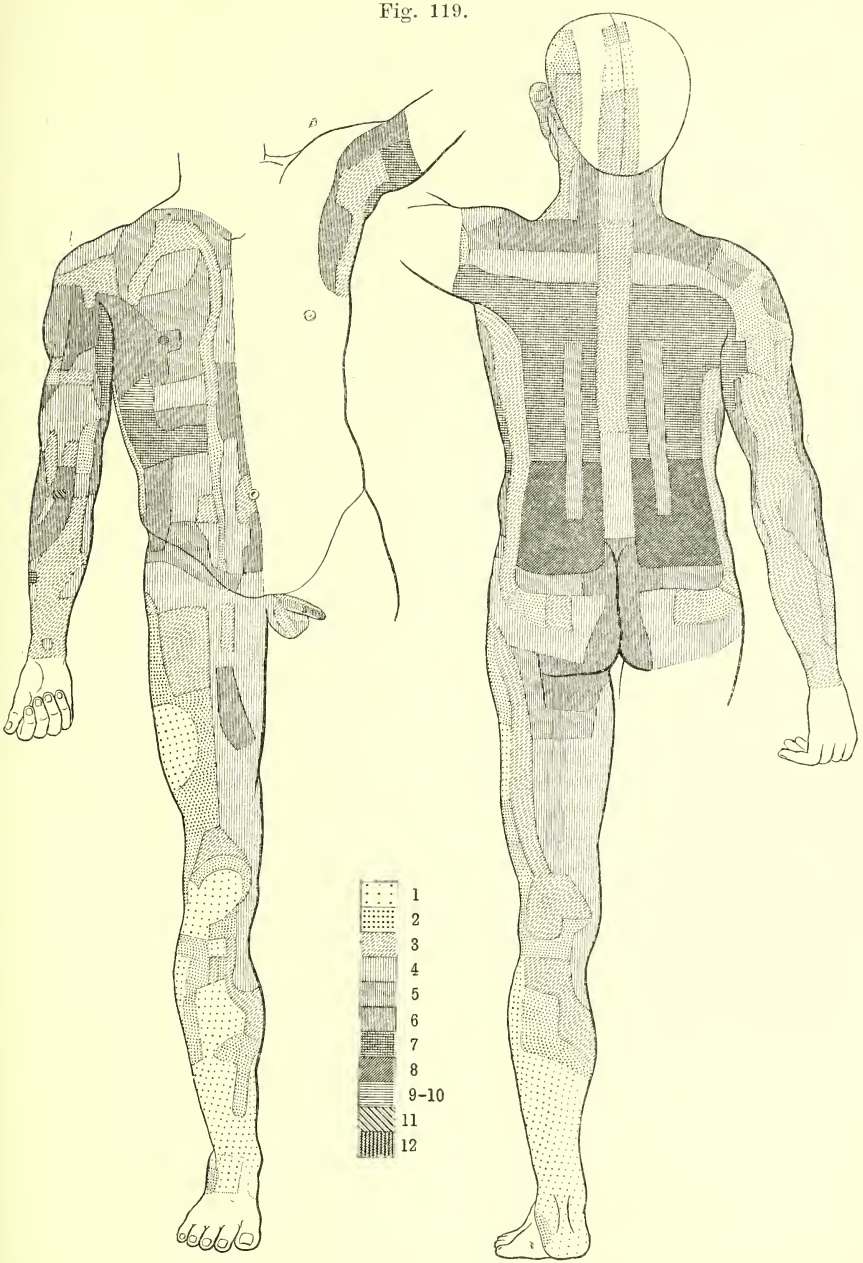
Fig. 118.



Die Bedeutung des Ortes der Reizung ist zuerst von Weber[1]) untersucht. Nachher haben besonders Nothnagel[2]) und Goldscheider[3]) Beobachtungen darüber veröffentlicht. Indessen sind die Ergebnisse nicht als ganz rein anzusehen, da sie nicht nur durch die den verschiedenen Haut-

[1]) Wagners Handwb. 3, 3. Abteil., 554. — [2]) Deutsch. Arch. f. klin. Med. 2, 284, 1867. — [3]) Arch. f. Psychiatrie u. Nervenkrankh. 18, 659, 1887.

Fig. 119.



stellen fest zukommenden Eigenschaften beeinflußt sind, sondern auch durch mehr zufällige Dinge, z. B. durch die Eigentemperatur der betreffenden Hautstellen. Doch wäre es leicht, die Bedeutung der Eigentemperatur auszuschließen, man brauchte nur den verschiedenen miteinander zu vergleichenden Hautstellen dieselbe Oberflächentemperatur zu geben, indem man sie genügende Zeit der Einwirkung einer und derselben konstanten Temperatur

aussetzt. An den so vorbehandelten Hautstellen kann man nachher die Schwellenwerte bestimmen resp. die Intensitäten der durch überschwellige Reize ausgelösten Empfindungen miteinander vergleichen.

Weber benutzte teils Glasphiolen, die er mit Öl füllte, durch Eintauchen in warmes oder kaltes Wasser temperierte und dann auf die Haut aufsetzte, teils einen großen Schlüssel, den er erwärmte oder abkühlte, und mit dessen abgerundetem Ende er die Haut berührte. Durch Vergleichen der Stärke der so ausgelösten Eindrücke bestimmte er die Empfindlichkeit der verschiedenen Hautstellen. Seine Werte sagen also nichts über die Schwellenwerte aus. Die Haut des Gesichtes schien Weber alle anderen Teile an Empfindlichkeit zu übertreffen, insbesondere galt dies von den Augenlidern und den Backen. Die Lippen standen den Lidern und Backen nach. Am Halse war die Empfindlichkeit für Temperatureindrücke viel geringer als im Gesichte. Die Haut in der Gegend der Medianlinie des Gesichtes, der Brust, des Bauches und des Rückens war viel weniger empfindlich als die seitlich angrenzenden Teile, die Empfindlichkeit an der Nasenspitze viel geringer als an den Seiten der Nase, viel größer an den Nasenflügeln und am größten am unteren Rande des äußeren Teiles derselben. Dicht vor dem Tragus des Ohres war die Empfindlichkeit viel größer als an den Lippen, über dem unteren Rande der Kinnlade größer als am Kinn, in der Schläfengegend über dem Jochbein größer als in der Mitte der Stirn über der Glabella. Die innere Haut der Nase zeigte eine sehr geringe Empfindlichkeit, die Haut des Gehörganges dagegen eine große. Wie diese Wiedergabe der Weberschen Ergebnisse zeigt, umfassen sie bei weitem nicht alle Körperteile. Vollständiger sind die Angaben Nothnagels. Auch er berührte die einzelnen Körperteile verschiedener Individuen nach Webers Vorgang mit dem cylindrischen Ende eines sehr großen kalten oder warmen Schlüssels (die Temperaturen sind nicht angegeben). Die wesentlichen Ergebnisse waren folgende. Die empfindlichsten Partien des Gesichtes, welchen nur noch die Seitenwandungen des Rumpfes an die Seite zu stellen sind, sind die Lider, die Wangen und Schläfen, die stumpfeste ist der Nasenrücken. Der Rumpf ist stumpfer als das Gesicht. Die vordere Thoraxwand ist unten meist empfindlicher als oben, der Rücken unempfindlicher als die vordere Wand des Rumpfes. Die Medianlinie ist im Gesicht wie am Rumpf stumpfer als die seitlichen Partien, das Sternum stumpfer als die Linea alba. Hand und Finger sind meist gleich empfindlich, der Vorderarm empfindlicher als die Hand, der Oberarm empfindlicher als der Vorderarm. Analoge Verteilung der Empfindlichkeit findet sich an den unteren Extremitäten. Die entsprechenden Partien sind am Bein stumpfer als am Arm. Das Verhalten der einzelnen Flächen an den verschiedenen Extremitäten ist kein konstantes, doch meist erschien die Streckseite am Oberarm und Oberschenkel empfindlicher als die Beugeseite, am Unterarm und Unterschenkel umgekehrt. Die Dorsalfläche der Finger und Hand war empfindlicher als die Volarfläche. Die Ergebnisse Webers und Nothnagels lassen deutlich erkennen, daß sie vor der Entdeckung der Dualität der Temperaturempfindungen gewonnen sind. Nach dieser Entdeckung konnte man mit großer Wahrscheinlichkeit erwarten, daß eine vollständige Übereinstimmung zwischen den topographischen Verhältnissen der Wärme- und Kälteempfindlichkeit sich nicht würde nachweisen lassen. Dies ist auch nach Goldscheider der Fall. Er verwendete für die Reizung der Kälteneryen Metallcylinder von ungefähr 15° C, für die der Wärmenerven Cylinder von 45 bis 49°. Um die Empfindlichkeit der verschiedenen Hautstellen zu klassifizieren, unterscheidet Goldscheider 12 Stufen der Kälteempfindlichkeit, bezüglich der Wärmeempfindlichkeit 8 Stufen. Je höher die Empfindlichkeit ist, desto höher wird die Zahl, durch welche sie gekennzeichnet wird. Die von Goldscheider an den verschiedenen Körperstellen gefundenen Empfindlichkeiten kommen in den Figuren 118 (Kälteempfindlichkeit) und 119 (Wärmeempfindlichkeit) zur Anschauung.

Die Verhältnisse finden sich nach Goldscheider bei verschiedenen Individuen ziemlich übereinstimmend wieder. Jedoch kann gegen diese Goldscheiderschen Untersuchungen eingewendet werden, daß die Bestimmung der Intensität der Wärmeempfindungen unter Anwendung so hoher Temperaturgrade gemacht ist

(Metallcylinder von 45 bis 49°), daß dabei sicher nicht die reinen Wärmeempfindungen allein, sondern gleichzeitig die durch Hinzutreten der paradoxen Kälteempfindungen entstehenden Hitzeempfindungen die Klassifizierung mit bestimmt haben (Alrutz[1]), und es muß zurzeit dahingestellt bleiben, ob nicht die topographischen Verhältnisse für die Wärmeempfindlichkeit bei Untersuchung mit niedrigeren Reiztemperaturen sich anders gestalten.

Bei der Deutung der Ungleichheit der Empfindungsintensitäten von verschiedenen Hautstellen legt Goldscheider das größte Gewicht auf die Verbreitung der Nerven. Die Stellen von hoher Empfindungsintensität entsprechen den dichten Nervenkonzentrationen in den Zentren faserreicher Innervationsbezirke, die Stellen von niedriger Empfindungsintensität den Zentren faserarmer Innervationsbezirke und den Hautpartien, welche durch die peripherstenNervenausläufer versorgt werden. Es wäre möglich, diese Deutung durch Bestimmungen der Anzahl der Kälte- und Wärmepunkte in den verschiedenen Bezirken zu verifizieren. Über die Bedeutung der verschiedenen Tiefenlage der Endorgane ist noch nichts Bestimmtes zu sagen.

Die Schwellenwerte der Temperaturreize sind von Eulenburg[2]) gemessen worden. Er benutzte zwei verschieden temperierte Thermometer von zweckmäßiger Form, von denen das eine sich auf oder möglichst nahe der neutralen Eigentemperatur der zu prüfenden Hautstelle befand — das andere oberhalb oder unterhalb dieses Temperaturgrades geändert wurde, bis eine eben merkliche Kälte- oder Wärmeempfindung entstand. Sowohl für den Kälte- wie für den Wärmesinn wechselten bei einer Hauttemperatur von 27 bis 33° C die Schwellenwerte zwischen 0,2 und 1,1° C. Im allgemeinen stehen die von Eulenburg erhaltenen Resultate den Nothnagelschen hinsichtlich der meisten Körperregionen ziemlich nahe. Im großen nd ganzen schienen diejenigen Körperteile, welche am häufigsten unbedeckt bleiben Gesicht, Hände), die bei weitem feinste Unterschiedsempfindlichkeit für thermische Reize zu besitzen. Beachtenswert ist auch die ungleiche Feinheit der Temperatursinne an den Extremitäten; beispielsweise fand Eulenburg am Ober- und Unterschenkel die Unterschiedsempfindlichkeit in der Nähe des Kniegelenks viel feiner als in den vom Kniegelenk entfernteren Abschnitten nach Fuß und Rumpf zu.

Bedeutung der Fläche. Schon Weber[3]) hat hervorgehoben, daß die Größe des Stückes der Haut, welches gleichzeitig von einem warmen oder kalten Körper affiziert wird, einen Einfluß auf die Empfindung der Wärme hat. Wenn man z. B. in dieselbe warme oder kalte Flüssigkeit den Zeigefinger der einen Hand und die ganze andere Hand gleichzeitig eintaucht, so ist die Empfindung in beiden Gliedern nicht dieselbe, sondern in der ganzen Hand intensiver. Weber teilt mit, daß man in dieser Weise Wasser, das $29^1/_2{}^0$ R warm ist und in das man die ganze Hand eintaucht, für wärmer hält als Wasser, das 32° R warm ist und in das man nur einen Finger eintaucht; in dieselbe Täuschung wird man versetzt, wenn man Wasser von 17° und 19° R in der beschriebenen Weise untersucht. Es ist indessen zu bemerken, daß zwar die Bedeutung der Fläche ganz sicher in der Richtung, wie es Weber darstellt, liegt, aber daß in den erwähnten Versuchen möglicherweise die verschiedene Empfindlichkeit der verschiedenen Partien der Hand von Einfluß gewesen ist. Nähere einwandfreie Bestimmungen liegen noch nicht vor.

Die Eigenschaften des äußeren Reizes, welche auf den Reizerfolg von Einfluß sind. Die äußeren Reizmittel, welche Temperaturempfindungen hervorrufen, können in vielfacher Weise variieren. Es können

[1]) Noch nicht veröffentlichte Untersuchung. — [2]) Zeitschr. f. klin. Med. 9, 174, 1885. — [3]) Wagners Handwb. 3, 2, 553.

feste, flüssige und gasförmige Körper in Frage kommen, und diese können durch Wärmeleitung oder durch Wärmestrahlung wirken; sie können gute oder schlechte Wärmeleiter sein und entweder eine kleine oder große Wärmekapazität besitzen. Sie können die Haut überall gleichförmig berühren oder ihre Gestaltung erlaubt nicht eine gleichförmige Berührung. Die Bedeutung der meisten von diesen Faktoren ist noch nicht durch quantitative Messungen klargestellt.

Am einfachsten liegen die Verhältnisse bezüglich des Einflusses der Wärmekapazität, welcher in folgender Weise formuliert werden kann: Jeder die Haut berührende Gegenstand, dessen Temperatur von derjenigen der oberflächlichsten Hautschicht differiert, der also die allgemeine Bedingung für thermische Reizung erfüllt, muß außerdem je nach seiner Temperatur eine gewisse minimale Wärmekapazität haben, um überhaupt eine Temperaturempfindung hervorzurufen. Wenn diese Wärmekapazität nicht erreicht wird, wird keine Empfindung erhalten, wenn sie eben erreicht wird, bekommt man eine minimale Empfindung, die bei erhöhter Kapazität an Stärke zunimmt. Endlich erreicht man einen Grenzwert der Wärmekapazität, oberhalb dessen die Empfindung nicht mehr an Intensität gewinnt. Dagegen kann die Zeitdauer der Empfindung auch dann noch weiter beeinflußt werden. Man kann, von dieser Bedeutung der Wärmekapazität ausgehend, der Haut verschieden kräftige thermische Reize zuführen, indem man sie mit gleich temperierten Gegenständen von verschiedener Wärmekapazität berührt. Die Anwendung allzu extremer Temperaturen begegnet aber praktischen Schwierigkeiten. Innerhalb gewisser Temperaturgrenzen aber sind die Versuche leicht ausführbar, und hier haben sich Silber- oder Kupferlamellen (sog. Reizlamellen) von verschiedener Dicke als vorzüglich geeignet erwiesen [1]). Durch Anwendung solcher Lamellen kann man leicht die Wärmemenge bestimmen, welche für eine Wärmeempfindung erforderlich ist.

Die Bedeutung des Wärmeleitungsvermögens. Unter sonst identischen Verhältnissen ist die Temperaturempfindung um so intensiver, je besser der als Reiz verwendete Gegenstand die Wärme leitet. Ob dies ganz allgemein gültig ist, oder ob es eine obere Grenze gibt, über welcher, durch Körper noch besseren Wärmeleitungsvermögens keine weitere Erhöhung der Intensität der Temperaturempfindung erreichbar ist, ist noch nicht untersucht. Es ist bei dieser Bedeutung des Wärmeleitungsvermögens möglich, eine Serie ungleich gut wärmeleitender Gegenstände von einer und derselben Temperatur so zu ordnen, daß sie eine Skala ungleich kräftiger Temperaturempfindungen hervorrufen.

Das oben Gesagte gilt nur von der Intensität der bei der ersten Berührung entstehenden Empfindungen. Während einer längeren Berührungszeit können neue Verhältnisse sich einstellen, indem durch den Wärmeaustausch die Oberflächentemperatur des Gegenstandes sich ändert. In dieser Weise kann z. B. bewirkt werden, daß eine erste Kälteempfindung in eine Wärmeempfindung umschlägt. Hering hat Beispiele hierfür gegeben. Legen wir eine Hand an einen schlechten Wärmeleiter — wie z. B. Wachstaffet — von Zimmertemperatur, so fühlt sich derselbe anfangs kühl an, bald aber verschwindet

[1]) Thunberg, Upsala Läkaref. förh. 1894/95.

die Kühle und macht einer deutlichen, bis zu einem gewissen Grade wachsenden und lange anhaltenden Wärmeempfindung Platz. In analoger Weise erhalten wir Wärmeempfindungen, wenn wir Handschuhe oder Kleider anziehen. Die so entstehende Wärmeempfindung beruht auf der durch den Wärmeaustausch entstehenden höheren Oberflächentemperatur des schlechten Wärmeleiters. Je schlechter der Wärmeleiter ist, desto höher wird seine Oberflächentemperatur, wenn der Wärmestrom ein stationäres Stadium erreicht hat; sie kann dann mit derjenigen der Haut als identisch angesehen werden. Je schneller sie erreicht wird, desto kräftiger ist die dabei entstehende Wärmeempfindung. Der obere Grenzwert dieser Geschwindigkeit der Temperaturänderung ist dadurch bestimmt, daß die Erwärmung vom Blut aus durch die Hautschichten hindurch erfolgen muß. Das eben Gesagte gilt mutatis mutandis auch für die Abkühlung eines zuerst hoch temperierten schlechten Wärmeleiters.

Die Bedeutung der Oberflächenbeschaffenheit. Je besser ein Gegenstand mit seiner Berührungsfläche sich der Haut anschmiegt, desto größere Bedeutung hat sein Wärmeleitungsvermögen für den Wärmeaustausch und für die Empfindung. Wenn nennenswerte Zwischenräume hier und da sich finden, ist natürlich auch das Wärmeleitungsvermögen des den Zwischenraum ausfüllenden Mediums von Bedeutung. Ist, wie gewöhnlich, die Luft das Medium, so bewirkt dies im allgemeinen gleichfalls eine Verschlechterung des Wärmeleitungsvermögens des berührenden Gegenstandes.

Was oben über die Eigenschaften gesagt wurde, kraft deren ein äußerer Reiz auf den Reizerfolg seinen Einfluß ausübt, ist nichts als eine Zusammenstellung der einfachsten und leicht kontrollierbaren Erfahrungstatsachen. Für Behandlung des Problems in seiner ganzen Ausdehnung und für quantitative Bestimmungen sind die meisten erforderlichen Zahlenwerte über das Wärmeleitungsvermögen und die Wärmekapazität der Haut usw., wenigstens in anwendbarer Form, noch nicht da [1]). Einige mathematische Betrachtungen über die Wärmebewegung in der Haut bei äußeren Temperatureinwirkungen sind von Goldscheider [2]) geliefert worden.

Die Unterschiedsempfindlichkeit für Kälte- und Wärmereize. Die Bestimmungen der kleinsten noch wahrnehmbaren Temperaturdifferenzen zweier, sonst gleicher fester Körper oder Flüssigkeiten sind meistens zu der Zeit gemacht, als das Dasein besonderer Kältenerven und besonderer Wärmenerven noch nicht bekannt war. Man hat infolgedessen nicht genau zwischen der Leistungsfähigkeit der Wärmenerven einerseits und derjenigen der Kältenerven anderseits unterschieden. Auch hat man zwei verschiedene Fragen nicht genügend auseinandergehalten, nämlich erstens die, wie groß der Temperaturunterschied zweier Reize sein muß, um einen eben merklichen Unterschied der dadurch hervorgerufenen zwei Kälteempfindungen oder zwei Wärmeempfindungen hervorzurufen, und zweitens die Frage, wie nahe einander auf der Thermometerskala die beiden Temperaturen liegen, welche eine minimale Kälte- resp. eine minimale Wärmeempfindung hervorzurufen

---

[1]) Siehe die Literaturzusammenstellung in Mračeks Handbuch der Hautkrankheiten, Wien 1901, S. 199. — [2]) Alfred Goldscheider, Ges. Abh. **1**, 355.

imstande sind. Diese letzte Frage befaßt sich ja nicht mit der kleinsten Differenz der Reize, welche zwei ungleich intensive Empfindungen derselben Qualität hervorrufen, sondern bezieht sich auf einen Vergleich der Schwellenwerte zweier Empfindungen verschiedener Qualität mit Rücksicht auf ihre Lage auf der Thermometerskala. Die Unterschiedsempfindlichkeit für Kälte- und Wärmereize muß verschieden gefunden werden je nach der Art des Reizes, und zwar in dem Sinne, daß die Unterschiedsempfindlichkeit um so höhere Werte annimmt, je bessere Wärmeleiter bei der Untersuchung Verwendung finden. Von den so mit verschiedenen Wärmeleitern erhaltenen Werten ist der obere Grenzwert von größtem Interesse, da ja bei einer Bestimmung der Unterschiedsschwelle zunächst beabsichtigt wird, die Leistungsfähigkeit des Sinnesnerven festzustellen. Um diesen oberen Grenzwert sicher zu erreichen, dürfte es angemessen sein, möglichst gute Wärmeleiter anzuwenden, so daß man annehmen kann, daß die Berührungsfläche während des Versuches sich auf konstanter Temperatur hält. Da weiter der Wärmezustand der untersuchten Hautstelle von Bedeutung ist, muß dieser bekannt sein; diese Bestimmung ist auch, wie schon Hering[1]) betont hat, notwendig, damit die Ergebnisse verschiedener Versuche vergleichbar werden. Daß die hier hervorgehobenen Gesichtspunkte bei den bisherigen Untersuchungen zu wenig im Auge behalten wurden, ist bei der Beurteilung der hierunter mitgeteilten Ergebnisse im Gedächtnis zu behalten.

Aus naheliegenden Gründen ist in erster Linie die Fähigkeit unserer Hände und Finger, Temperaturunterschiede zu erkennen, näher untersucht worden. Weber[2]), von dem die ersten einschlägigen Angaben herrühren, fand, daß es am zweckmäßigsten ist, eine und dieselbe Hautstelle nacheinander mit den zu vergleichenden Körpern in Berührung zu bringen. Taucht man nämlich zwei Finger derselben Hand gleichzeitig in zwei nebeneinander stehende Wassergefäße, so ist die Möglichkeit, zu vergleichen, sehr beeinträchtigt. Besser gelingt sie zwar, wenn man zwei entsprechende Finger der rechten und linken Hand benutzt, aber viel vollkommener führt man die Vergleichung zweier Temperaturen aus, wenn man die beiden Finger abwechselnd in die beiden Gefäße eintaucht, und am allervollkommensten, wenn man denselben Finger oder dieselbe Hand bald in das eine, bald in das andere Gefäß eintaucht. Unter diesen Umständen kann man nach Weber bei großer Aufmerksamkeit mit der ganzen Hand noch die Verschiedenheit zweier Temperaturen wahrnehmen, die nur ein Fünftel oder sogar ein Sechstel eines Grades Réaumur beträgt. Nachher hat Fechner[3]) die gleiche Frage in Angriff genommen mit der besonderen Absicht, zu prüfen, ob das Webersche Gesetz sich in diesem Falle gültig erweisen würde oder nicht. Wie Fechner richtig bemerkt, ist die Reizgröße hierbei durch die Differenz zwischen der Reiztemperatur und der Indifferenztemperatur bestimmt. Beachtet man jedoch die Art und Weise, wie er seine Versuche anstellte, so kann man nicht anerkennen, daß damit eine Prüfung des Weberschen Gesetzes vorgenommen wurde. Er tauchte nämlich zuerst die Finger in ein Gefäß mit Wasser, bis sie eine konstante Temperatur angenommen hatten[4]), dann abwechselnd in dieses und in ein anderes Gefäß, dessen Temperatur geändert wurde, bis der Temperaturunterschied merkbar wurde. In dieser Weise wird je eine Bestimmung des eben merklichen Reizes für die Wärme- und die Kältenervenenden abwechselnd gemacht, nicht aber eine Prüfung der Gültigkeit des Weberschen Gesetzes, welches fordert, daß man zwei Kältereize oder zwei Wärmereize anwendet und feststellt, welche Reizgrößen zwei eben merklich verschieden intensive Kälte- resp. Wärmeempfindungen auszulösen vermögen.

[1]) Hermanns Handb. **3**, 434. — [2]) Wagners Handwb. **3**, 2, 554. — [3]) Elemente der Psychophysik **1**, 201, 1860. — [4]) Was Fechner damit meint, geht freilich nicht aus seinen Mitteilungen hervor.

Fechners Versuche sind jedoch insofern interessant, als sie angeben, wie groß der eben merkliche Reiz bei verschiedener Lage der Indifferenztemperatur ist. Er fand die größte Empfindlichkeit gegenüber Reiztemperaturen zwischen 10 bis 20° R, und zwar war dieselbe hier so groß, daß die eben merklichen Temperaturunterschiede mittels des benutzten Thermometers nicht mehr gemessen werden konnten, obwohl dasselbe sehr wohl gestattete, den zwanzigsten Teil eines Grades Réaumur abzuschätzen. Bei Temperaturen, welche unter 10° R liegen, nimmt die Empfindlichkeit viel rascher mit der Tiefe der absoluten Temperatur ab als bei Temperaturen oberhalb 20°.

Lindemann[1]), dessen Versuche nach der Methode der mittleren Fehler ausgeführt wurden, fand beim Eintauchen der Hand bis an die Handwurzel die größte Unterschiedsempfindlichkeit für Temperaturen zwischen 26 bis 39° C. Im Mittel konnte er eine Temperaturdifferenz von $^1/_{20}$° C noch deutlich unterscheiden. Er bestätigte übrigens die Angabe Fechners betreffs der raschen Abnahme der Unterschiedsempfindlichkeit für niedrige Temperaturen. Alsberg[2]) benutzte als Reize zwei Gläser mit verschieden temperiertem Wasser; er tauchte, ohne zu wissen, in welchem Glase das wärmere oder kältere Wasser enthalten war, das Endglied des Zeigefingers zuerst in das eine und ließ es dort zwischen 10 bis 20 Sekunden verweilen, trocknete rasch ab und steckte den Finger in das zweite Glas. Er konnte in dieser Weise unterscheiden: bei 10° C 0,9°, bei 15° 0,4°, bei 20° 0,5°, bei 25° 0,7°, bei 30° 0,5°, bei 35° 0,1°, bei 40° 0,2°. Es muß befremden, daß nach diesen Resultaten die Empfindlichkeit bei niedrigen Temperaturen Unregelmäßigeiten zeigt. Nothnagel[3]) ist denn auch zu anderen Resultaten gekommen. Seine ausgedehnten Untersuchungen ergaben folgendes: Das feinste Unterscheidungsvermögen liegt entschieden zwischen 27 bis 33° C, nur wenig unsicherer ist es bis 39° aufwärts, dann bis 49° (schmerzhaft) ziemlich schnell wesentlich unsicherer. Von 27 bis 14° abwärts nimmt die Empfindungsschärfe etwa gleich stark ab wie von 33 bis 39° aufwärts und fällt von 14 bis 7° wieder schnell ab. Die Versuche wurden in derselben Weise angestellt, wie sie Fechner gemacht hatte, nur daß Nothnagel nicht wie Fechner zwei, sondern nur einen Finger eintauchte. Bei weiteren Versuchen, in denen er als Temperaturreize zwei cylindrische, wassergefüllte Gefäße mit kupfernem Boden von $1^1/_2$ Zoll Durchmesser anwendet, hat er die Unterschiedsempfindlichkeit verschiedener Körperteile miteinander verglichen. Man unterscheidet auf dem Sternum 0,6° C, Brust oben außen 0,4° C, Oberbauch in der Mitte 0,5°, Rücken in der Mitte 1,2°, Rücken seitlich 0,9°, Hohlhand 0,5 bis 0,4°, Handrücken 0,3°, Vorderarm, Streckseite 0,2°, Vorderarm, Beugeseite 0,2°, Oberarm, Streckseite 0,2°, Oberarm, Beugeseite 0,2°, Fußrücken 0,5 bis 0,4°, Unterschenkel, Streckseite 0,7°, Unterschenkel, Beugeseite 0,6°, Oberschenkel, Streckseite 0,5°, Oberschenkel, Beugeseite 0,5°, Wange 0,4 bis 0,2°, Schläfe 0,4 bis 0,3°. Bei der Beurteilung dieser Werte ist zu berücksichtigen, daß die Hauttemperatur der verschiedenen Stellen nicht angegeben ist.

Über den Einfluß einiger Variablen auf die Unterschiedsempfindlichkeit für Temperaturreize hat Alsberg Versuche angestellt. Er fand, daß Anämie eines Fingers eine deutliche Verfeinerung des Unterscheidungsvermögens bewirkte, während Hyperämie dasselbe nicht wesentlich zu alterieren schien. Über den Einfluß andauernder Kälte und Hitze teilte Nothnagel einige Versuche mit. Legte er bei verschiedenen Personen auf die Innenseite des Vorderarms einen Eisbeutel eine halbe bis eine Stunde lang, so wurde an dieser Stelle Wärme und Kälte viel weniger intensiv empfunden als am anderen Arm. Bei der Prüfung mittels der oben erwähnten Gefäße zeigte sich, daß an dieser Stelle, wo normal 0,3 bis 0,2° C unterschieden wurden, jetzt erst eine Differenz von 1 bis 3° C zur Wahrnehmung gelangte. Wurde die Hand eine halbe bis eine Stunde lang in Wasser von 42 bis 45° C getaucht, so wurden erst 0,4 bis 0,3° C mit dem Finger der eingetauchten Hand unterschieden, mit der anderen Hand schon 0,2 bis 0,1° C.

---

[1]) De sensu caloris. Halsi 1857. Dissertation. — [2]) Untersuch. über d. Raum- und Temperatursinn. Marburg 1863. Dissertation. — [3]) Deutsch. Arch. f. klin. Med. 2, 284, 1867.

Wie diese Darstellung zeigt, sind die bisherigen Untersuchungen über die Unterschiedsempfindlichkeit für Temperaturreize spärlich, und die meisten Fragen, z. B. über die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes, über die Bedeutung der Adaptation usw., bleiben noch zu lösen.

Der zeitliche Verlauf der Temperaturempfindungen ist nicht eingehend untersucht. Zwischen den Kälteempfindungen und den Wärmeempfindungen besteht der Unterschied, daß bei vergleichbarer Reizintensität die ersteren langsamer anschwellen als die letzteren, eine Erscheinung, welche durch die tiefere Lage der Wärmeendorgane wahrscheinlich bedingt ist. Wie häufig Kälte- resp. Wärmeempfindungen, ohne zu verschmelzen, einander folgen können, ist noch nicht untersucht; ebenso ist die Frage offen, welche Empfindungen bei schnell intermittierenden Wärme- und Kältereizen entstehen.

VI. Die Hautschmerzempfindungen.

Unter „Schmerzempfindungen" werden hier Empfindungen eigenartiger Qualität verstanden, welche schon bei sehr schwacher Intensität einen sehr unangenehmen Gefühlston haben, der ihnen unauflösbar anhaftet. Dieser zwischen dem Gefühlston und dem übrigen Empfindungsinhalt bestehende feste Zusammenhang ist eine für die Schmerzempfindungen charakteristische Eigentümlichkeit. Gewisse Geschmacks- und Geruchsempfindungen sind zwar auch durch einen ausgeprägt unangenehmen Gefühlston ausgezeichnet, aber dieser kann bei ein und derselben Empfindungsintensität durch andere Umstände sehr beeinflußt werden, z. B. durch Zumischung anderer Empfindungen. Um ihrem wesentlichen Merkmal gerecht zu werden, haben die Schmerzempfindungen ihren Namen ausschließlich nach ihrem Gefühlston erhalten, während die Namen der übrigen Hautempfindungen deren Qualität angeben. Aber eben auf die Tatsache, daß der Gefühlston der Schmerzempfindungen ausschließlich für die Bezeichnung bestimmend gewesen ist, ist es wohl zurückzuführen, daß man die Vergleichbarkeit der Schmerzempfindungen mit den anderen Empfindungen ebenso wie ihre spezifische Qualität lange Zeit übersehen hat. Im folgenden wird der Schmerz als eine mit den übrigen Empfindungen vergleichbare Empfindung angesehen, welche wie diese Qualität, Intensität, Lokalzeichen und Gefühlston hat.

Die teleologische Bedeutung des Schmerzes besteht darin, den Körper gegen solche intensive Reize jeder Art zu schützen, welche die Integrität desselben bedrohen. Daß indessen die Schmerzempfindungen nicht als unfehlbarer Indikator für drohende Schädigungen anzusehen sind, zeigt die Erfahrung. Teils entstehen bisweilen sehr kräftige Schmerzempfindungen, z. B. bei Neuralgien, ohne daß der Körper oder die Gewebe entsprechend geschädigt sind, teils fehlen die Schmerzempfindungen, obwohl die Gewebe angegriffen werden, z. B. in vielen Fällen, wenn Bakterien den Körper angreifen. Man kann zwar die Zweckmäßigkeit der Schmerzempfindungen etwas größer finden, wenn man sich erinnert, daß häufig das Individuum gar keinen Nutzen von Nachrichten über Gewebsschädigungen haben kann, da es dem schädlichen Einfluß nicht entfliehen kann. Vor allem aber ist zu betonen, daß jede Zweckmäßigkeit in der organischen Welt begrenzt ist und

daß die Sinnesorgane wie alle anderen Organe nur zur Funktion unter normalen Verhältnissen und nicht für seltene Ausnahmezustände zweckmäßig eingerichtet sind. Häufig bringen sie schon Nachricht von einer den Geweben drohenden Gefahr, nicht nur von bereits vor sich gehenden Zerstörungsprozessen, wie sonst vielfach angenommen wird [1]).

Wenn man die Haut z. B. mit Wärme reizt und von kaum als warm empfundenen Temperaturen zu höheren übergeht, so wird die Wärmeempfindung allmählich intensiver und endlich schmerzhaft. In derselben Weise gehen die Druckempfindungen in Druckschmerzempfindungen, die Kälteempfindungen in Kälteschmerzempfindungen über. Es läge nahe, diese Beobachtungen so zu deuten, daß Schmerz durch eine sehr intensive Erregung derselben Nerven entsteht, welche, schwächer erregt, unsere gewöhnlichen Sinnesempfindungen auslösen. Eine solche Deutung ist zurzeit wenigstens in ihrer allgemeinen Fassung ganz verlassen, wenn auch die Ansichten bezüglich mancher Detailfragen sich noch gegenüberstehen. Doch hat die Theorie besonderer Schmerznerven — Nerven also, welche nur Empfindungen der für die Schmerzempfindungen eigentümlichen Qualität auslösen — immer mehr Anhänger gewonnen.

Der erste, der für die Existenz besonderer Schmerznerven eingetreten ist, scheint Brown-Sequard [2]) gewesen zu sein, der schon früh einen mit besonderen Nervenfasern ausgerüsteten Schmerzsinn annahm. Gleichfalls schon vor langer Zeit hat sich auch Funcke [3]) für eine solche Möglichkeit ausgesprochen. In einer ausgezeichneten Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten der Auslösung des Schmerzes hebt er z. B. hervor, daß die Beobachtungen über Analgesie ohne Anästhesie sehr gegen die Annahme sprechen, daß dieselben Nerven den Schmerz und die übrigen Empfindungsqualitäten vermitteln. Die isoliert auftretende Analgesie läßt sich — so argumentiert Funcke — nicht aus einer Abstumpfung der Empfindlichkeit der peripherischen Enden eines für Tast- und Schmerzempfindung gemeinschaftlichen Nervenapparats erklären, denn abgesehen von den Tatsachen, welche ganz bestimmt auf eine zentrale Quelle des Zustandes hinweisen, wäre es paradox, eine Abstumpfung für starke mechanische und thermische Reize, welche Schmerz erzeugen, anzunehmen und die Erregbarkeit desselben Apparates für schwache Reize gleicher Art fortbestehen oder sogar wachsen zu lassen. Ein analoges Räsonnement verbietet, die Erklärung in einer Herabsetzung der Reaktionsfähigkeit eines gemeinschaftlichen zentralen Empfindungsapparates für starke Erregungen wie sie die Schmerzreize an der Peripherie auslösen, zu suchen. Unter solchen Umständen sieht er sich zu der Annahme gezwungen, daß mindestens vom Rückenmarke an eine Scheidung der Wege und Apparate für Tast- und Schmerzeindrücke stattfindet, und zwar im Sinne der zuerst von Schiff [4]) aufgestellten Hypothese, nach welcher die Tasteindrücke durch die Fasern der weißen Hinterstränge, die Schmerzeindrücke durch die graue Substanz

[1]) Siehe z. B. Griesinger, Arch. f. physiol. Heilkunde 1 (1843); Naunyn, Arch. f. exp. Pathol. u. Pharmakol. 25, 287, 1889; Tschisch, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 26 (1901); Strümpell, Deutsch. med. Wochenschr. 1904, S. 1461. — [2]) Journ. de Physiol. 6, 124, 232, 581, 1864 (nur durch Referat bekannt). — [3]) Hermanns Handb. 3 (2), 294 u. ff. — [4]) Lehrbuch d. Physiol. 1, 228. Lahr 1858 (zit. nach Funcke).

den betreffenden Empfindungsapparaten zugeleitet werden. Ob die Scheidung erst im Rückenmark beginnt oder bereits diesseits desselben im peripherischen Teil der Tast- und Schmerzwerkzeuge vorhanden ist, läßt er unentschieden.

Für den ersteren Fall entwickelt er die Vorstellung, daß eine und dieselbe Nervenfaser ihre Erregungen in dem Rückenmark auf zwei Bahnen überführen kann, und zwar würden die Bahnen von großem Widerstand, d. h. diejenigen, welche zunächst wenigstens in der grauen Substanz verbleiben, für die Leitung der Schmerzempfindungen benutzt, dagegen müßten die von geringerem Widerstande in die weiße Substanz übertreten und als Längsfasern eines Hinterstranges zu den Tastempfindungsapparaten im Hirn führen. Dabei wäre leicht zu begreifen, daß die durch Tastreize erweckten schwachen Erregungen ungeteilt zu den Tastempfindungsapparaten abflössen, daß die starken, durch Schmerzreize erzeugten Erregungen dagegen an der Teilungsstation der Bahnen sich verzweigend zu einem kleineren oder größeren Bruchteil unter Überwindung des größeren Widerstandes in die andere Bahn eintretend zu den Schmerzempfindungsapparaten vordrängen.

Im zweiten Falle, d. h. bei der Annahme einer von der Peripherie bis zum Zentrum durchgehenden Scheidung des Tast- und Schmerzapparates muß nach Funcke vorausgesetzt werden, daß die Tast- und Schmerznervenfasern gesondert, jede wahrscheinlich mit anderer Endvorrichtung, entspringen und, isoliert zum Rückenmark verlaufend, jede für sich in die ihr zugehörige weitere Bahn einmünden. Mit großer Wahrscheinlichkeit spricht nach Funcke zugunsten einer solchen Scheidung der von den Histologen allgemein angenommene Gegensatz zwischen solchen Nervenfasern, welche mit freien Enden in den Epithelialüberzug der Haut hineinragen, und solchen, deren Enden mit besonderen Terminalapparaten in Verbindung treten. Die weitere Deutung, daß erstere den durch die groben allgemeinen Reize zu erweckenden Schmerzempfindungen, letztere den durch die spezifischen Tastreize hervorzurufenden Tastempfindungen dienen, ergibt sich von selbst.

Bei der Wahl zwischen diesen zwei von Funcke so klar hervorgehobenen Möglichkeiten haben die Forscher auf diesem Gebiete sich lange Zeit fast sämtlich für die erste erklärt, wenn auch einige entschieden für die letztere eingetreten sind. Durch die sorgfältigen Studien v. Freys über die Schmerzpunkte der Haut hat jedoch, soweit man zurzeit urteilen kann, diese letztere sich als die richtige erwiesen. Zur Klärung des Problems sind übrigens Beiträge von mehreren Seiten geliefert. (Siehe die Kontroversen zwischen Nichols[1]), Marshall[2]), Witmer[3]) und Strong[4]), zwischen Richet und Frédéricq[5]).

Die Schmerzpunkte. Bei seinen mit punktförmigen Reizen ausgeführten Untersuchungen fand Blix unter anderem, daß man hier und da die Nadelspitze ziemlich tief in die Haut einführen konnte, ehe die geringste Schmerzempfindung zu bemerken war, während gewisse Punkte so empfindlich waren, daß ein leiser Druck auf die Nadel genügte, um Schmerz

[1]) Philos. Rev. 1 (1892); Psychol. Rev. 2 (1895); ebenda 3 (1896). — [2]) Philos. Rev. 1 (1892); Psychol. Rev. 2 (1895). — [3]) Journ. of neur. and mental diseas. 1894. — [4]) Psychol. Rev. 2 (1895); ebenda 3 (1896). — [5]) Rev. Scientifique 6 (1896).

hervorzurufen. Eine Untersuchung über die Topographie der Schmerzempfindlichkeit [1]), welche er vornahm, schien ihm jedoch für die Annahme von spezifischen Endapparaten des Schmerzsinnes keine Stütze zu liefern. Er ließ daher die Frage offen, sprach aber doch die Vermutung aus, daß der Schmerz entsteht, wenn die Gewalt den sensiblen Nervenfaden selbst trifft, er mag sonst peripherisch mit einem Endorgan beliebiger Natur verbunden sein.

Für die Ansicht, daß es keine besonderen Schmerznerven gibt, ist Goldscheider [2]) entschieden eingetreten. Da er nun Analgesie der Kälte- und Wärmepunkte festgestellt hatte, betrachtet er als schmerzempfindende Apparate die Drucknerven, an denen nach ihm starke Reizung einen intensiven Schmerz hervorrufen soll; auch die zwischen den Druckpunkten nach seiner Meinung endenden besonderen Nerven, die Gefühlsnerven, sollen in gleicher, wenn auch viel schwächerer Weise auf Druck- und Schmerzreize reagieren.

Ganz anders liegen aber die Verhältnisse nach den ausgedehnten Untersuchungen v. Freys [3]). Nach ihm kann man mit passenden mechanischen Reizen isolierte, eng umschriebene, mit den Druckpunkten im allgemeinen nicht zusammenfallende Orte maximaler Schmerzempfindlichkeit nachweisen. Nach diesem Resultat ist die Folgerung unabweisbar, daß unter diesen Stellen maximaler Schmerzempfindlichkeit, den Schmerzpunkten, besondere Schmerznervenenden liegen. Unter gewöhnlichen Umständen ist es zwar nicht möglich, bei mechanischer Reizung dieser Punkte eine von Berührung- und Druckempfindung freie Erregung der Schmerzpunkte zu erreichen. Wenn man aber nur sehr spitzige Reize verwendet, wenn man weiter den Versuch nach Durchfeuchtung der Epidermis zwischen fern voneinander liegenden Druckpunkten anstellt, kann man die Schmerzempfindungen ohne voraufgehende oder begleitende Druckempfindungen erhalten. Durch diese und ebenso durch die weitere Beobachtung, daß isolierte Schmerzempfindungen in derselben Weise durch chemischen Reiz, sowie unter gewissen Bedingungen auch durch den elektrischen Reiz zu erhalten sind, ist die Auffassung des Schmerzes als einer durch zu starken Reiz veränderten Druckempfindung ausgeschlossen.

Die Schmerzpunkte sind durch eine für schwache Reize sehr lange Latenz und durch große Trägheit gegenüber rasch sich ändernden bzw. oszillierenden Reizen ausgezeichnet und zeigen auch durch diese Eigentümlichkeit, daß sie mit den Druckpunkten nicht identisch sind. Sie sind viel zahlreicher als die Druckpunkte; man kann annehmen, daß sich durchschnittlich über 100 im Quadratcentimeter finden, also mindestens viermal so zahlreich als die Druckpunkte.

Große Differenzen zeigen auch die Druck- und Schmerzpunkte, was die Schwellenwerte bei mechanischer Reizung auf verschiedenen Reizflächen betrifft. Wenn man größere Flächen anwendet (zwischen 3,5 bis 12,6 qmm) und ihren Reizwert durch ihren Druck auf die Flächeneinheit ausdrückt, finden sich als Schwellenwerte für die Druckempfindung Werte bis herab zu 20 mg/qm oder 0,002 Atm., für die Schmerzempfindungen 2 Atm. (die

[1]) Zeitschr. f. Biol. **25**, 158, 1885. — [2]) Ges. Abh. **1**, 199. — [3]) Leipziger Abh. 1896.

Atmosphäre = 10 g/mm). Die Empfindlichkeit der Nervenenden des Drucksinnes ist demnach für die Einwirkungen genannter Flächengröße etwa 1000 fach größer als die der Schmerznerven. Mit der Abnahme der Reizfläche gewinnt aber ein gegebener mechanischer Reiz relativ an Wirksamkeit für die Schmerzpunkte, derart, daß für sehr kleinflächige Reize die Schmerzschwelle tiefer liegen kann als die Druckschwelle.

Man vertrat früher allgemein die Meinung, daß Schmerz erst dann auftritt, wenn der die Haut treffende Reiz so stark ist, daß er als allgemeiner Nervenreiz auf die Nerven direkt wirkt, wobei häufig auch die Haut und der Nerv eine Schädigung erfahren sollten. Bei näherem Studium der Sache hat man indessen gefunden, daß Schmerz durch so schwache mechanische (v. Frey[1]) und thermische Reize (Verf.[2]) ausgelöst werden kann, daß ihnen eine direkte Verletzung der Nerven nicht zugeschrieben werden kann; auch sind sie zu schwach, um als allgemeine Nervenreize in Betracht zu kommen. Daß die Schmerzempfindung bei andauernder Deformation der Haut andauernd ist, spricht ebenfalls gegen eine direkte Wirkung des mechanischen Reizes auf die Nerven.

Dagegen spricht auch die Beobachtung, daß man bei momentan wirkenden mechanischen und thermischen Reizen, die eben die Schmerzschwelle überschreiten, eine sehr (0,9 Sekunden) verzögerte Schmerzsensation erhält. Diese Verzögerung kann nicht durch eine verlangsamte Leitung in den Nerven oder im Rückenmark erklärt werden, sondern muß auf peripherische Ursachen zurückgeführt werden, da sie die für peripherische Ursachen charakteristische Abhängigkeit von Art und Angriffspunkt der Reize unzweideutig aufweist; sie spricht also gegen die Annahme, daß die Reize die Nerven direkt als Angriffspunkt benutzen. Als allgemeiner Nervenreiz angewendet, zeigt der momentane mechanische Reiz ja keine solche Latenz, und dasselbe dürfte auch von dem momentanen thermischen Reiz gelten. Alles dies nötigt zu der Annahme, daß in den Enden der Schmerznerven oder um dieselben Vorrichtungen existieren, welche diese schwachen Reize in Nervenreiz transformieren. Da die Latenzzeit für momentan wirkenden thermischen Reiz dieselbe ist wie bei ebensolchem Druckreiz, werden wahrscheinlich die beiden Reizarten in derselben Weise transformiert. v. Frey hat die Ansicht ausgesprochen, daß die mechanischen Reizmittel einen wahrscheinlich physikalisch-chemischen Zwischenprozeß in den Endorganen auslösen.

Seine Vorstellung über die Art dieses Zwischenprozesses geht von der Auffassung aus, daß die freien Nervenenden im Stratum germinativum die Schmerzempfindungen vermitteln. Für diese Ansicht, welche, wie oben angegeben, schon Funcke ausgesprochen hat, hat v. Frey mehrere wichtige Gründe angeführt. Die trotz Verkleinerung der Fläche unveränderte Wirksamkeit von Reizen konstanten Druckes, welche er gefunden hat, die niedrige Punktschwelle bei elektrischer Reizung, das primäre Auftreten der Schmerzempfindung beim Anätzen der Haut, fordern, daß die Empfindung des Schmerzes ihren Auslösungsort näher der Oberfläche als die Druckempfindung haben muß. Näher der Oberfläche als die Tastkörperchen — die Endorgane der Drucknerven an unbehaarten Hautstellen — liegen aber

[1]) Leipziger Abhandl. 1896, S. 261. — [2]) Skand. Arch. f. Phys. 12, 394 1901.

nur die intraepithelialen Nervenenden, welche daher als die Organe der (oberflächlichen) Schmerzempfindung der Haut zu betrachten sind. Zu dem gleichen Schlusse wurde v. Frey auch durch seine Untersuchungen über die Verbreitung der einzelnen Empfindungsarten über die Hautoberfläche geführt. Die Cornea, deren Nervenendigungen intraepithelial sind, besitzt seiner Meinung nach, ihren Randteil ausgenommen, nur Schmerzempfindung. Diese intraepithelialen Nervenenden werden nach der Meinung v. Freys [1]) durch eine Veränderung der umgebenden Flüssigkeit gereizt, welche durch eine unter der Druckerhöhung aus den Zellen in die Zwischenräume übertretende Flüssigkeit verursacht wird; die Reizung erfolgt dann entweder, weil die an den Nerv herantretende Lösung zu verdünnt ist (infolge Undurchlässigkeit der Zellwand für die in der Zelle gelösten Stoffe), oder weil neue fremdartige Stoffe an den Nerv gelangen.

Gegen die Annahme, daß die freien intraepithelialen Nervenenden die anatomische Grundlage der Schmerzpunkte sind, sind gewisse Einwände nicht zu unterdrücken, bezüglich deren hier auf das S. 655 Gesagte verwiesen werden kann [2]).

Summationserscheinungen bei der Auslösung des Schmerzes. Richet [3]) hat auf den Unterschied der Empfindungsintensität bei Applikation eines einzelnen Induktionsschlages und mehrerer solcher hingewiesen. Bei einer Stärke der Schläge, bei welcher ein einzelner Schlag keinen Schmerz hervorruft, gibt eine Reihe solcher vielleicht eine sehr schmerzhafte Empfindung. In der Tat entstehen auch bei Anwendung anderer Reize Schmerzempfindungen durch Summation mehrerer, einzeln schmerzunterschwelliger Erregungen. Als ein für die Entstehung der Schmerzempfindungen charakteristisches Merkmal kann jedoch eine solche Summation nicht angesehen werden, denn alle anderen Nerven zeigen ein solches Verhalten mehr oder weniger ausgeprägt, und Schmerzempfindungen können auch durch einen einzelnen genügend starken Reiz ausgelöst werden. Das ungewöhnlich deutliche Hervortreten der Summation bei der Auslösung der Schmerzempfindungen dürfte von der großen Trägheit der Schmerznervenenden (ev. der Ganglienzellen oder anderer nervöser Teile) bedingt sein, die auch in der großen Reaktionszeit für schwache Schmerzreize zum Ausdruck kommt (s. S. 710). Goldscheider [4]) hat indessen die Summation als den wesentlichen inneren Vorgang, welcher der Schmerzempfindung zugrunde liegt, angesehen (s. S. 710). Das ist bei seinem Standpunkte verständlich, ist aber bei Annahme besonderer Schmerznerven ganz überflüssig.

Die verschiedenen Schmerzqualitäten. Daß unsere Schmerzempfindungen sehr verschiedener Art sein können, ist eine alltägliche Erfahrung und damit hängt zusammen, daß der Sprachgebrauch für die nähere Spezialisierung über eine ganze Reihe von Bezeichnungen verfügt; so spricht man

[1]) Leipziger Abhandl. 1896, S. 261. — [2]) Siehe auch Oppenheimer, Schmerz- und Temperaturempfindung. Berlin 1893. Nach O. werden die Schmerzempfindungen durch die Gefäßnerven besorgt. — [3]) Recherches expérimentales et cliniques sur la sensibilité. Paris 1877. — [4]) Über den Schmerz. Berlin 1894, S. 20 (daselbst mehrere Literaturangaben).

von stechendem, schneidendem, drückendem, ziehendem, dumpfem, brennendem, klopfendem usw. Schmerz. Diese Unterschiede sind großenteils nicht durch wirkliche Qualitäten der durch die Schmerznerven ausgelösten Empfindungen bedingt. Durch Beimischung anderer Empfindungen, durch Eigentümlichkeiten in der räumlichen Verbreitung, im zeitlichen Verlaufe erhalten die Schmerzempfindungen häufig einen besonderen Charakter. Durch Beimischung von Wärme- (und Kälte-)empfindungen entstehen die brennenden Schmerzen, durch den rhythmischen Wechsel der Intensität entstehen die klopfenden Schmerzen usw.

Inwieweit alle die Eigentümlichkeiten, welche die verschiedenen Schmerzarten zeigen, in dieser Weise erklärt werden können, ist eine Frage, deren Lösung bei der Schwierigkeit, die verschiedenen Schmerzarten einer experimentellen Analyse zu unterwerfen, noch nicht endgültig geliefert ist. Durch Beobachtungen auf dem Gebiete der Hautschmerzen, wo eine solche Analyse am leichtesten ausführbar ist, ist es jedoch wahrscheinlich gemacht, daß es zwei Arten Schmerznerven gibt, von welchen die eine die stechenden Schmerzempfindungen, die andere die dumpfen auslösen (Thunberg [1]). Wenn man an die Haut sehr oberflächlich wirkende Schmerzreize appliziert, erhält man nur stechende Schmerzempfindungen, sei es, daß die Reize thermisch, mechanisch, elektrisch oder chemisch sind, sei es, daß sie langsam anschwellen oder schnell angreifen. Wenn man dagegen auf große, in die Höhe gehobene Hautfalten drückt und den Druck auf die Mitte, nicht auf die Biegungskante ausübt, so daß der Druck auf die tieferen Teile kräftig wirkt, erhält man bei schwächster Reizung eine dumpfe Schmerzsensation. Dasselbe ist der Fall bei präformierten Hautfalten, z. B. den Ohrzipfeln, den Hautfalten zwischen den Fingern. Dieser Unterschied in dem Charakter der Empfindungen ist weder durch Beimischung anderer Empfindungen zu erklären (da solche hier nur wenig mitspielen), noch ist es wahrscheinlich, daß die verschiedene Reizungsweise die Verschiedenheiten der Empfindungen zu erklären vermöchte. Gegen diese Möglichkeit spricht der große Unterschied zwischen den beiden Empfindungsarten, ferner auch der Umstand, daß man, wie auch oberflächlich wirkende Reize appliziert werden, niemals eine dumpfe Schmerzempfindung erhält. Beruhte die bei tieferem Druck entstehende dumpfe Schmerzsensation nur auf der Reizungsweise, so könnte man ja erwarten, daß sie auch durch zweckmäßige Änderungen der Reizungsweise der oberflächlichen Schichten der Haut zu erhalten wären, z. B. wenn eine kleine Hautfalte sehr langsam gedrückt würde. — Die Tatsache, daß man von den kleinsten Hautfalten nur stechende Sensationen erhält, spricht also dafür, daß die nervösen Bildungen, die den dumpfen Schmerz vermitteln, an tiefere Schichten gebunden sind. Bedenkt man, daß, wenn eine größere Falte einem gleichförmigen Drucke ausgesetzt wird, der schwächste Schmerz erzeugende Reiz nur den dumpfen Schmerz hervorruft, so ist dies wohl dahin zu deuten, daß die nervösen Bildungen, die dies vermitteln, für Druck empfindlicher sind als die, welche den stechenden Schmerz vermitteln, da ja der Reiz diese letzteren mindestens in gleichem Grade treffen muß.

---

[1]) Skand. Arch. f. Physiol. 15, 394, 1901. Siehe auch Alrutz, Undersökningar öfver smärtsinnet. Upsala 1901, p. 97.

Auch die Ergebnisse bei Anwendung von thermischen, elektrischen und chemischen Reizmitteln (siehe Thunberg und Alrutz[1]) lassen sich in gleichem Sinne verwerten, d. h. dahin, daß in oder unmittelbar unter der Haut zwei Arten Schmerznerven sich finden mit verschiedenen spezifischen Energien; die eine Art gibt stechende, die andere dumpfe Schmerzempfindungen.

Es wurde angenommen, daß dieselben Schmerznerven sowohl durch Kälte-Wärmereize wie durch mechanische Reize erregt werden können. Gegen einen solchen Standpunkt ist der Einwand gemacht, daß gewisse pathologische Beobachtungen für besondere Druckschmerznerven, besondere Wärmeschmerznerven usw. sprechen[2]). Man hat z. B. Analgesie gegen mechanische Reize gleichzeitig mit Hyperalgesie gegen thermische Reize gefunden. Die vorliegenden Beobachtungen sind jedoch zu wenig zahlreich, und bei der Deutung dieser Dinge ist zu berücksichtigen, daß man durch Nadelstiche nur schwache Schmerzempfindungen hervorrufen kann und daß, wenn die Nadel bei vermehrtem Druck durch die Epidermis gedrungen ist, die stechende Schmerzempfindung häufig verschwindet. Eine unbedeutende Hypalgesie kann, wenn man dies nicht berücksichtigt, eine Analgesie vortäuschen. Übrigens wäre es möglich, daß die Nervenfasern unter pathologischen Verhältnissen abnorme Verknüpfungen eingehen könnten. Wenn z. B. die Endorgane der Temperaturnerven mit den Schmerznerven in Verbindung träten, könnte eine Hyperalgesie gegen Temperaturreize entstehen ohne Druckhyperalgesie usw.

Die bei schwächster Erregung der Schmerznerven entstehenden Empfindungen. Wenn man die Haut mit einer spitzen Nadel berührt, erhält man oft schwache, stechende Sensationen, die durchaus nicht mit irgend welchem Schmerz verbunden sind. Trotzdem dürften diese stechenden Empfindungen durch dieselben Nerven ausgelöst werden, die bei stärkerer Reizung die wirklich schmerzhaften stechenden Sensationen veranlassen. Diese Empfindungen können nämlich nicht als eine durch einen spitzen Gegenstand ausgelöste Berührungsempfindung gedeutet werden, was daraus hervorgeht, daß sie auch durch schwache elektrische und thermische Reizung zu erhalten sind. Da sie qualitativ mit den Berührungs- oder Temperaturempfindungen nichts zu tun haben, bei höherer Reizintensität dagegen ohne Qualitätsänderung in die schmerzhaften stechenden Sensationen übergehen, ist ihr Zusammenhang mit diesen letzteren klar.

Auch von der Mundhöhle und den Nasenhöhlen werden, besonders bei chemischer Reizung, Sensationen ausgelöst, die gleichfalls als stechend bezeichnet werden können, und die nicht schmerzhaft wirken, solange sie sehr schwach sind, die es aber bei größerer Intensität werden. Das Freisein dieser Sensationen von Schmerz wird recht gut durch den Umstand beleuchtet, daß sie ganz sicher eine wichtige Komponente in der Geschmacksempfindung darstellen, die durch verschiedene unserer Gewürze, z. B. Senf und Pfeffer, erregt wird, und zwar auch bei Intensitäten, wo diese Empfindungen immer

---

[1]) Smärtsinnet. Upsala 1901. — [2]) Strong, Psychol. Rev. 2 (1895). Alrutz, a. a. O., S. 71.

noch angenehm sind. Auch Kohlensäure (in kohlensäurehaltigen Getränken) und Alkohol können angenehme zusammengesetzte Empfindungen geben, von denen diese stechenden Empfindungen einen Bestandteil ausmachen.

Die Tatsache, daß dieselben Nerven, welche die stechenden, mit sehr unangenehmem Gefühlston versehenen Schmerzempfindungen auslösen, auch die schwachen, beinahe oder gar nicht gefühlsbetonten Stichempfindungen auslösen, machen ihre Benennung als Schmerznerven etwas inexakt; vielleicht wäre es besser, sie als Stichnerven oder Stichschmerznerven und die von ihnen ausgelösten Empfindungen als Stichempfindungen, bei höherer Intensität als Stichschmerzempfindungen zu benennen. Wenn die hier vorgetragene Meinung richtig ist, kann dies für die Auffassung einiger schwächerer Empfindungen von Bedeutung sein, deren Klassifikation noch strittig ist.

Die Schmerzempfindlichkeit verschiedener Hautstellen. Algesimetrie. Die Schmerzempfindlichkeit verschiedener Hautstellen ist Gegenstand mehrerer Untersuchungen gewesen, von denen die Mehrzahl klinischen Bedürfnissen ihren Ursprung verdankt. Die Resultate sind indessen keineswegs als sicher anzusehen, da die Methoden häufig mangelhaft waren.

Mechanische Reize. Wie abhängig die Ergebnisse von den Methoden sind, geht deutlich aus einem Vergleich der mit zwei verschiedenen Apparaten, dem Björnströmschen und dem Moczutkowskischen Algesimeter, erhaltenen Werte hervor.

Der Algesimeter Björnströms[1]) ist eine Kneifpinzette, die es ermöglicht, eine Hautfalte zu heben und auf dieselbe einen auf einer Skala in Kilogramm ablesbaren Druck zu applizieren. Wenn man stets gleich große Hautfalten aufhebt, wenn man den Druck immer in derselben Weise anbringt und nur einmal bei jeder Untersuchung dieselbe Hautfalte kneift, und wenn man endlich darauf sieht, daß die Hauttemperatur normal ist, bekommt man nach der Angabe Björnströms konstante Werte. Der Schwellenwert wechselt für die verschiedenen Körperteile zwischen $^1/_2$ bis 12 kg. Als allgemeines Resultat seiner Untersuchungen ist hervorzuheben: Herabsetzung der Sensibilität über allen dicht unter der Haut liegenden prominierenden Knochenpartien, wie über den Knöcheln, dem Ellbogen, den Klavikeln, der Spina scapulae, dem Trochanter major, der Kniescheibe und den Malleolen, weiter die Herabsetzung an einigen Beugefalten, wie in den Handgelenken, den Ellbogengelenken, der Achselhöhle, der Kniekehle, an den Augenlidern.

Moczutkowskis[2]) Apparat erlaubte, eine Nadel mit veränderlichem Druck gegen die Haut zu setzen. Sein Apparat berührte die Haut mit einer konvexen Oberfläche von 1 cm Durchmesser. In derselben war ein zentrales Loch, durch welches eine 1 mm dicke Nadel hervortrat, welche in einer scharf geschliffenen, 1 mm hohen konischen Spitze endete. Diese Nadel konnte in einer verschiedenen, in 0,1 mm ablesbaren Länge über die konvexe Oberfläche hervorgeschraubt werden. Im ganzen kann die Spitze 2 mm hervortreten. Die Schmerzempfindlichkeit wird dadurch bestimmt, daß man untersucht, wieviel die Nadel über die Oberfläche hervorgeschoben werden muß, um bei Druck gegen die Haut Schmerz hervorzurufen. Moczutkowski teilt eine Zusammenstellung über die Empfindlichkeit verschiedener Stellen mit. Sie wechselt bei Gesunden zwischen 0,15 bis 1,5 mm Nadellänge. Der Mittelpunkt der kleinsten Schmerzempfindlichkeit der Haut ist nach Moczutkowski das Becken, und von diesem Ort aus erhöht sich allmählich die Empfindlichkeit, wenn man sich dem Kopf, den Fingern und den Zehen nähert. Wie bei Anwendung des Björnströmschen Algesimeters ist dabei die Dicke der zwischen

[1]) Nove acta soc. scient. Upsala 1877. Siehe auch Pacht. Über die cutane Sensibilität usw. Inaug. Diss., Dorpat 1879. — [2]) Nouvelle Iconographie de la Salpêtrière 11, 230, 1898.

der Haut und den darunter liegenden Knochen befindlichen Schicht von großer Bedeutung, aber in gerade entgegengesetzter Weise, so daß die Schmerzempfindlichkeit nach Moczutkowski um so größer ist, je dünner diese Schicht ist.

Die Deutung dieses scheinbar paradoxen Befundes dürfte darin liegen, daß die oberflächlichsten Hautschichten einen höheren Schwellenwert als die tieferen, eventuell das Periost, haben. Da die oberflächlicheren Hautschichten über prominierenden Knochenpartien leichter verschiebbar sind, kann man sie hier mittels der Björnströmschen Kneifzange isoliert heben, und ihre höhere Schmerzschwelle bestimmt hier den erhaltenen Wert. Wenn man dagegen einen Druck gegen einen dicht unter der Haut liegenden Knochen ausübt, bestimmen die tieferen Schichten, eventuell das Periost, den Wert, weil sie empfindlicher sind und bei der Anlagerung an den unterliegenden Knochen für Druckreize sehr zugänglich sind. Bei den durch den Björnströmschen Apparat für die verschiedenen Körperteile erhaltenen Werten ist vielleicht auch der Umstand von Bedeutung, daß die in den erhobenen Hautfalten liegenden Nerven nicht nur gedrückt, sondern auch gedehnt werden, was ja leicht geschieht, wenn die Haut mit unterliegenden Geweben fest verbunden ist.

Auf die vielen anderen Methoden für mechanische Hautreizung [1]) kann hier nicht eingegangen werden, nur mag hervorgehoben werden, daß die Methoden, bei welchen Nadeldruck gegen die Haut ausgeübt wird, nur auf der Applikation eines Druckes auf die Haut, nicht auf einem Eindringen der Spitze in dieselbe beruhen. Bei normalen Individuen wenigstens liegt die Schmerzschwelle weit unter einem Drucke, der ein Eindringen in die Haut bewirkt. Ja für sehr spitze Nadeln liegt die Sache so, daß die Schmerzempfindung schwächer wird, vielleicht verschwindet, wenn die Nadelspitze in die Haut eindringt; das ist bei der Anwendung jedes Nadelalgesimeters zu berücksichtigen.

Thermische Reize. Theoretisch kann sowohl Wärme wie Kälte als Schmerzreiz verwendet werden. Es ist indessen natürlich, daß Wärmereizung leichter zu bewerkstelligen ist. Die einfachste Weise, die Schmerzempfindlichkeit mit Wärmereizen zu bestimmen, besteht darin, den Temperaturgrad zu suchen, welchen ein die Haut berührender, gut wärmeleitender Gegenstand haben muß, um eine Schmerzempfindung hervorzurufen.

Die ausführlichsten thermoalgesimetrischen Beobachtungen rühren von Donath [2]) und Vereß [3]) her. Die äußersten Grenzen für das Auftreten des Kälteschmerzes waren nach Donath — 11,4 und 2,8° C, für das Auftreten des Wärmeschmerzes 36,3 und 52,6° C. Auch Vereß, der nur das Auftreten des Wärmeschmerzes untersuchte, fand für die verschiedenen Körperteile bedeutende Unterschiede. Eine minimale Schmerzempfindung wurde durch Temperaturen zwischen 44 und 52° hervorgerufen, es bestand also zwischen den Schwellenwerten an verschiedenen Körperteilen ein Unterschied von nicht weniger als 8°. Berechnet man, wieviele Hundertstel der ganzen Körperfläche die den verschiedenen Schwellenwerten entsprechenden Körperteile betragen, so erhält man die folgende Tabelle.

44°	1,5 Proz.	49°	15 Proz.
45°	2,5 „	50°	5 „
46°	6 „	51°	4 „
47°	28 „	52°	4 „
48°	34 „		

[1]) Siehe Kulbin, L'année psychologique 1896, p. 83 u. 438. v. Bechterew, Neurol. Zentralbl. 1899, S. 386. Hess, Deutsch. med. Wochenschr. 1892, S. 210. Buch, Petersb. med. Wochenschr. 1891 u. 1892. MacDonald, L'intermédiaire des biologistes **13**, 288, 1898. Thunberg, Ups. Läkaref. förh. **8**, 560, 1902/03. — [2]) Arch. f. Psychiatrie **15**, 695, 1884. — [3]) Pflügers Arch. **89**, 1, 1902.

Bei diesen verschiedenen Empfindlichkeiten der verschiedenen Körperteile ist die Dicke des Stratum corneum von großer Bedeutung derart, daß ein um so kräftigerer Reiz erforderlich ist, je dicker das Stratum corneum ist. Ob andere Umstände, z. B. eine geringere Anzahl der Nervenenden in der Flächeneinheit, auch mitspielen, mag dahingestellt bleiben. Übrigens sind die Methoden von Donath und Vereß nicht einwandfrei.

Thunberg[1]) hat eine Methode angegeben, mit einer und derselben hohen Temperatur die Schmerzempfindlichkeit zu bestimmen. Wenn man über eine Serie ungleich dicker Metalllamellen, z. B. Silberlamellen, disponiert, welche der leichteren Handhabung wegen an einem schlecht wärmeleitenden Griff befestigt sind, und sie auf einer und derselben hohen Temperatur, z. B. 100°, hält, indem man sie auf ein kochendes Wasserbad stellt, und wenn man sie dann mit der Haut in Berührung bringt, so gibt jede, je nach ihrer Dicke, eine bestimmte Wärmemenge an die Haut ab. Wenn man in einer Tabelle die in Milligramm ausgedrückten Gewichte der Silberlamellen, welche bei einer Berührungsfläche von 1 qcm eben zur Auslösung einer schwachen, stechenden Schmerzempfindung hinreichen, anordnet, so findet sich, daß das nötige Gewicht für den größten Teil der Körperoberfläche zwischen 45 und 60 mg liegt, daß es dagegen auf gewissen Stellen, auf der Volarfläche der Hände und der Finger und ebenso an den Füßen, zu einem ungleich höheren Werte, 100 bis 1000 mg, aufsteigt. Durch Berechnung der Wärmemenge, welche die Metalllamelle an die Haut abgibt, wenn ihre Bluttemperatur (hier = 38° angenommen) sinkt, erhält man eine Vorstellung von den Wärmemengen, welche zur Hervorrufung von minimalen Schmerzempfindungen auf 1 qcm Hautoberfläche appliziert werden müssen. Die Werte liegen im allgemeinen zwischen 167,40 bis 223,9 mg-Kalorien, können aber am Fuße und an den Händen auf 372 bis 3720 steigen. Hierbei sind die Dicke des Stratum corneum und der Wärmegrad der die Schmerznerven deckenden Hautschicht von großer Bedeutung.

Elektrische Reize. Die bis jetzt vorliegenden Bestimmungen der Empfindlichkeit verschiedener Hautstellen für elektrische Reize sind meistens mit veralteten Methoden ausgeführt worden, und die Ergebnisse haben auch wenig Wert. Prüft man, wie Bernhardt[2]) zuerst getan hat, die Haut mit Induktionsströmen, so findet man die Schmerzschwelle je nach dem Epidermiswiderstand bei verschiedenem Rollenabstand. Die so erhaltenen Zahlen, welche den Rollenabstand angeben, haben indessen einen sehr beschränkten Wert, weil sie ja bei verschiedener Stärke des primären Stromes und je nach der Anordnung des Induktionsapparates verschieden sind.

Wenn man, wie Tschieriew und de Watteville[3]) in die sekundäre Leitung des Induktoriums einen so großen Widerstand — bis 3000000 Ohm — einführt, daß der verschiedene Epidermiswiderstand seine Bedeutung verliert, so findet man die gleiche Schmerzempfindlichkeit an allen Hautstellen.

Nur wenige Versuche liegen vor, durch welche diese Fragen mit absolut graduierten Instrumenten und unter Berücksichtigung der verschiedenen Variabeln in Angriff genommen wurden. Über die Bedeutung der Frequenzen der Wechselströme hat v. Zeynek[4]) Versuche angestellt. Es kamen für langsamen Wechsel (0,3 bis 1 pro Sek.) Sinusströme zur Verwendung, die von einer Spule geliefert wurden, in welcher sich eine zweite, von Gleichstrom durchflossene Spule gleichmäßig drehte. Für Stromwechsel von 5 bis 110 pro Sekunde diente ein Kohlrauschscher Sinusinduktor, für Wechselströme von 600 bis 5000 Stromwechseln pro Sekunde eine besonders konstruierte Dynamo-

[1]) Upsala Läkaref. förh. 30, 521, 1894/95. — [2]) Die Sensibilitätsverhältnisse d. Haut. Berlin 1874. Siehe auch Bernhardt, Arch. f. klin. Med. 19, 382, 1877. — [3]) Brain 2, 163, 1879. — [4]) Göttinger Nachr. 1894, zit. nach Ergebn. d. Phys. 2 (2), 116.

maschine, deren Strom noch durch einen Transformator geleitet wurde. Endlich wurden Teslaströme angewendet. Im allgemeinen ergab sich, daß mit zunehmender Reizfrequenz die zur prickelnden Hauterregung[1]) erforderliche Stromstärke wächst. Für hohe Wechselzahlen stieg die für die Reizschwelle nötige Stromstärke proportional der Quadratwurzel der Wechselzahl an. Bei den Versuchen mit Teslaschwingungen trat keine prickelnde Empfindung auf.

Chemische Reize. Grützner[2]) hat Lösungen verschiedener chemischer Stoffe auf kleine Wunden der Finger, welche absichtlich beigebracht waren, aufgepinselt. Um die reizenden Wirkungen der verschiedenen Stoffe zu bestimmen, wurde die Zeit beobachtet, welche von dem Auftragen der Flüssigkeit bis zum Auftreten eines deutlichen Schmerzes verstrich. Jodnatrium erzeugte z. B. nach 5, Bromnatrium nach 10, Chlornatrium nach 50 Sek. eine Schmerzempfindung, wenn sie in der Stärke einer Normallösung angewendet wurden.

Schmerzempfindlichkeit der Mundhöhle. Die Wangenschleimhaut, die hinteren Teile des Mundraumes und die hintere Zungenhälfte haben eine wenig ausgebildete Schmerzempfindlichkeit. Einige Stellen der Wangenschleimhaut sind normal völlig schmerzfrei, auch wenn sie mit sehr kräftigen mechanischen und elektrischen Reizen untersucht werden (Kiesow[3]).

VII. Die Schmerzempfindlichkeit innerer Teile.

Über die Sensibilitätsverhältnisse der inneren Teile liegen Untersuchungen in größerer Anzahl vor. Die Physiologen des 17. und 18. Jahrhunderts teilen mehrere durch Tierexperimente gewonnene Resultate mit, und in der Zeit vor der Einführung der Äther- oder Chloroformnarkose in die Chirurgie wurden an Menschen viele wichtige Beobachtungen gemacht; allerdings widersprechen sich die Angaben aus dieser Zeit in vielen Punkten. Für Untersuchungen der Sensibilitätsverhältnisse der tieferen Teile ist eine neue Zeit angebrochen, seitdem die Methode, große Operationen bei nur lokaler Betäubung anzustellen, in die Chirurgie eingeführt ist; denn mehr als bei allgemeiner Narkose bietet sich hier Gelegenheit, die Sensibilität der verschiedenen Gewebe zu beobachten.

Eine sowohl in der älteren wie in der neueren Literatur häufig wiederkehrende Auffassung der Sensibilitätsverhältnisse der tieferen Teile nahm an, daß ein qualitativer Unterschied zwischen dem gesunden und dem kranken Zustande bestehen sollte. Wenn gesund, sollte ein Organ, auch wenn es gewaltsamen Reizen ausgesetzt wurde, keinen Schmerz auslösen können, wenn es dagegen krank würde, könnte es Sitz sehr ausgeprägter Schmerzen werden. Solche Angaben liegen über mehrere der inneren Organe vor, besonders aber der Organe der Brust- und Bauchhöhle.

Folgender Ausspruch eines Chirurgen[4]) dürfte als charakteristisch für die bisherige allgemeine Auffassung der Chirurgie angeführt werden.

---

[1]) Vielleicht beziehen sich also diese Untersuchungen auf die Drucknerven und nicht auf die Schmerznerven. — [2]) Pflügers Arch. **58**, 69, 1894. Siehe auch Rollet, ebenda **74**, 451, 1899. — [3]) Wundts philos. Stud. **14**, 567, 1898. — [4]) Bier, Die Entstehung des Collateralkreislaufes, Virchows Arch. **147**, 455, 1897.

„Bekanntlich besitzt der Darm keine Berührungs-, Tast-, Temperatur- oder Schmerzempfindung in dem Sinne, wie die äußeren Körperteile mit diesen Eigenschaften versehen sind. Daß man beim Menschen Darmteile, ohne daß der geringste Schmerz empfunden wird, schneiden, brennen, stechen, quetschen kann, ist jedem Chirurgen von der Anlegung des Anus praeternaturalis her bekannt. . . . Derselbe Darm, den man, ohne daß er die geringste Empfindung davon hat, stechen, brennen, schneiden und quetschen kann, vermag trotzdem die fürchterlichsten Schmerzen zu empfinden. Man denke nur an die heftigen Schmerzen, welche gewisse Krankheiten am Darm hervorrufen, und die wütend schmerzhaften Kolikanfälle bei chronischen Hindernissen im Darm."

Und Richet[1]) spricht folgende Auffassung aus, welche als unter den Physiologen üblich angesehen werden kann.

„Cette différence de sensibilité entre des parties enflammées et des parties saines est cette, que certains organes, absolument insensibles normalement, deviennent, sensibles aux excitations douloureuses quand ils s'enflamment." So verhält es sich nach Richets Meinung ungefähr mit der Sensibilität bei gewissen „Organes viscéraux, dont la sensibilité normale est pour le moins très obtuse. L'estomac, les intestins, la vésicule biliaire, la vessie sont dans ce cas".

Es ist das Verdienst Lennanders[2]), eine kritische Sichtung der schon vorhandenen Angaben und eine Serie neuer Untersuchungen vorgenommen zu haben; dadurch sind wahrscheinlich die Gegensätze zwischen dem kranken und dem gesunden Zustande zum großen Teil nur als scheinbar klargestellt, oder wenigstens eine vorher nicht berücksichtigte Möglichkeit, welche viele Schwierigkeiten leicht beseitigt, in die Diskussion eingeführt und die Fragestellung schärfer präzisiert worden. Nach Lennanders Untersuchungen sind alle die Schmerzen, die von der Bauchhöhle ausgelöst werden können, bloß auf die Teile zurückzuführen, die von den Intercostal-, Lumbal- und Sacralnerven innerviert werden, also besonders auf das Peritoneum parietale. Das Peritoneum parietale ist sowohl in gesundem wie in krankem Zustande empfindlich. Besonders ist es überaus empfindlich für mechanische Reize, für Ziehungen und Dehnungen.

Die intraperitoneal gelegenen Bauchviscera dagegen und das Peritoneum viscerale vermitteln weder in gesundem noch krankem Zustande Schmerzempfindungen. Besonders haben direkte Untersuchungen gezeigt, daß der Darmkanal und die Mesenterien, der Magen, der vordere Rand der Leber und die Gallenblase, die Milz, das Pankreas, das große Omentum, die Serosa an der Harnblase, sowie das Nierenparenchym unter allen Umständen unempfindlich sind. Wann und wie entstehen dann die Schmerzen, welche die Bauchkrankheiten begleiten? Sie entstehen dadurch, daß die krankhaften Prozesse in den unempfindlichen inneren Teilen in irgend einer Weise das empfindliche Peritoneum parietale reizen. Häufig dürfte bei Darmkrankheiten eine übermäßige Peristaltik oder eine übermäßige Darmausdehnung einen Zug auf das Peritoneum parietale ausüben, wobei die sehr häufig vorkommenden Adhäsionen von Bedeutung sind. Auch dürfte bisweilen die Reizung des Peritoneum parietale chemischer Natur sein, indem die in den kranken Teilen gebildeten chemischen, toxischen oder infektiösen Stoffe dahin diffun-

[1]) Dictionnaire de Physiol., Paris. — [2]) Mitteilungen aus den Grenzgeb. d. Med. u. Chirurg. **10** (1902) und Upsala Läkaref. förh. **9**, 54, 1903/04 ebenda mehrere geschichtliche Notizen.

dieren. Dadurch, daß unter diesen Umständen eine Hyperalgesie des Peritoneum parietale entsteht, erklärt es sich, daß sehr geringfügige Reize bei Krankheiten intensive Schmerzen auslösen können.

Dieselbe Verteilung der Sensibilitätsverhältnisse wie die Bauchhöhle zeigen vielleicht auch andere Körperhöhlen. Es ist nämlich wahrscheinlich, daß die Lungen keine Schmerzempfindungen auslösen können, während die Pleura parietalis schmerzempfindlich ist. — Ebenso dürften vielleicht das Gehirn und die Schilddrüse gefühllos sein. Überhaupt ist es nach Lennander wahrscheinlich, daß alle diejenigen Organe, die nur vom N. sympathicus oder N. vagus nach dem Abgange des N. recurrens innerviert werden, keine Schmerzempfindungen auslösen können.

Weitere Mitteilungen Lennanders[1]) machen es wahrscheinlich, daß die Schleimhaut des Rectums, der vorderen Wand der Scheide, die Gebärmutter, die Eierstöcke, die Eileiter und die angrenzenden Teile der Ligamenta lata der Schmerzempfindungen entbehren. Die Patienten reagieren nicht auf hier vorgenommene operative Eingriffe, vorausgesetzt, daß sie ohne Dehnung des Bindegewebes ausgeführt werden können, welches die Genitalia interna mit Beckenwand und Peritoneum parietale verbindet. Wahrscheinlich haben auch Hoden und Nebenhoden in ihren serosabekleideten Teilen keine Schmerznerven, während die Hüllen und das parietale Blatt der Tunica vaginalis schmerzempfindlich sind.

Das Periost ist sehr schmerzempfindlich. Die Knochensubstanz und das Knochenmark scheinen unempfindlich zu sein, oder, wenn sie Schmerznerven von dem Periost erhalten, müssen diese sehr kurz sein, denn wenn das Periost auf einer Stelle weggeschabt ist, ist der Knochen bis an die Grenze des Periosts unempfindlich[2]).

Zurzeit ganz unvermittelt im Verhältnis zu Lennanders Untersuchungen steht die besonders durch Head[3]) aktuell gewordene Lehre von den Reflexschmerzen. Schon Lange[4]) hatte mit Rücksicht auf die Tatsache, daß die inneren Organe gegen Berührung, ja sogar Schnitte, unempfindlich sind, hervorgehoben, daß die Schmerzen, welche durch Krankheiten innerer Organe entstehen, hauptsächlich reflektierte, irradiierende sind und daß in den schmerzhaften Gegenden oft Hyperästhesien entweder gleichzeitig mit oder zwischen den Schmerzanfällen sich entwickeln. Langes Arbeiten blieben aber unbeachtet. Nachdem aber Roß[5]) 1888 seine Studien über die Reflexschmerzen veröffentlicht hatte, und nachdem Mackenzie[6]) und besonders Head die Hyperalgesie der Haut eingehend beschrieben hatten, die mit dem Schmerz bei Visceralkrankheiten so häufig verbunden ist, ist dies Gebiet in den Vordergrund des Interesses getreten.

Heads Ansicht geht dahin, daß in den inneren Organen Schmerzempfindungen ausgelöst werden können, — zwar nicht durch alle Reize, sondern nur durch solche, welche von reißendem oder zerrendem Charakter sind — aber daß diese so ausgelösten Empfindungen meistens unrichtig lokalisiert werden[7]).

---

[1]) Upsala Läkaref. förh. **9**, 90, 1903. — [2]) Siehe auch Bloch, Nord. med. Ark. 1899, Nr. 33. — [3]) Brain **16**, 1; **17**, 339 oder Head, Die Sensibilitätsstörungen d. Haut bei Visceralkrankheiten, Berlin 1898. — [4]) Siehe die Histor. Fabers im Deutsch. Arch. f. klin. Med. **65**, 338. — [5]) Brain 1888. — [6]) Medical chronicle, August 1892. — [7]) Die Sensibilitätsstörungen usw., S. 108.

Zwar wird der Schmerz häufig in dem kranken Organ selbst gefühlt, aber er besteht dann nur in einem „dumpfen", „schweren", „matten" Gefühl. Der eigentliche Schmerz, welcher „scharf", „empfindlich", „stechend" ist, wird auf die Körperoberfläche bezogen, anstatt auf das tatsächlich erkrankte Organ.

Diese unrichtige Lokalisation setzt Head in Verbindung mit der geringen Empfindlichkeit der inneren Organe und erläutert seine Deutung mit folgendem Beispiel: Wenn ich mich in den Fuß steche, so fühle ich nirgends Schmerz als am Fuße selbst in der Gegend des Stichpunktes. Ist indessen die Empfindlichkeit am Stichpunkt krankhaft vermindert, wird der Schmerz nicht mehr auf den Stichpunkt, sondern etwas weiter nach oben auf eine Stelle intakter Sensibilität bezogen (eventuell bei intakter Sensibilität des gegenüberliegenden Fußes auf den entsprechenden Punkt des letzteren — Allocheirie). Die Lokalisation hängt in diesem Beispiele von folgendem Gesetze ab: Wird ein schmerzhafter Reiz an einer Stelle geringer Empfindlichkeit appliziert, welche in enger zentraler Verbindung mit einer Stelle von viel größerer Empfindlichkeit steht, so wird der hervorgerufene Schmerz in dem Gebiet höherer Empfindlichkeit viel stärker gefühlt als in dem weniger empfindlichen Teil, an dem der Reiz tatsächlich angebracht worden war. Aber demselben Gesetze gehorcht auch die Lokalisation der von inneren Organen ausgelösten Schmerzen. Diese Organe sind nämlich weniger empfindlich als die Haut, und ihre Nerven stehen in dem Rückenmark in enger zentraler Verbindung mit den Hautnerven. Die von den inneren Organen kommenden sensiblen Nerven treten nämlich nach Head in intime Verbindung mit Hautschmerzfasern desselben Spinalsegments.

Im Zusammenhang mit dieser Nervenanordnung findet Head auch die bei Visceralkrankheiten entstehenden Hauthyperalgesien begründet. Wenn nämlich in den sensiblen Nervenbahnen von einem erkrankten Organ aus Impulse zum Rückenmark gelangen, so müssen diese in dem Spinalsegment, in welches sie geleitet werden, eine Störung veranlassen. Irgend ein zweiter sensibler Impuls, der aus einem anderen Teile zu demselben Spinalsegment geleitet wird, muß dadurch eine tiefgehende Änderung erleiden, da er ja nicht mehr auf ein normales, in Ruhe befindliches Rückenmark trifft, sondern auf ein solches, dessen Funktion bereits gestört ist. Der zweite Reiz muß auf diese Weise verstärkt werden können, so daß ein vielleicht normalerweise nur unbequemer Reiz sehr schmerzhaft erscheinen kann.

Diese Ansichten stützt Head auf eingehende Untersuchungen der bei verschiedenen Organkrankheiten auftretenden hyperalgetischen Hautzonen. Er fand, daß diese Zonen für jedes erkrankte Organ charakteristisch und scharf begrenzt waren. Head fand weiter, daß die Zonen, in denen Herpes Zoster auftritt, die gleichen sind, die bei Hyperalgesie zu finden sind.

Es erhob sich also die Frage, in welcher Weise diese Hautzonen der Gliederung des zentralen Nervensystems entsprechen. Mit dem Verlaufe und der Ausbreitung der Hautnerven stimmen sie nicht überein. Eher gleichen sie den Ausbreitungen der hinteren Nervenwurzeln. Es geht ja auch schon aus den Untersuchungen von Bärensprung[1]) und den in letzter Zeit von Head und Campbell[2]) veröffentlichten Feststellungen hervor, daß das

[1]) Ann. des Charitékrankenhauses 9, 10, 11. — [2]) Brain 1900.

Spinalganglion bei Zostererkrankung angegriffen ist. Doch konnte man dagegen den Einwand erheben, daß die Ausbreitungszonen der Hinterwurzeln nach Sherrington[1]) übereinandergreifen. Head war daher zuerst der Meinung, daß seine hyperalgetischen Zonen einem Segment des Rückenmarkes entsprächen. Nachdem nun aber durch neue Untersuchungen von Sherrington[2]) gefunden ist, daß in den Wurzelgebieten die Überlagerung für die Fasern verschiedener Empfindungsqualitäten eine verschieden starke ist, für die Schmerzfasern eine geringere als für die taktilen Fasern, und nachdem die Herpeszonen als periphere Projektion der Spinalganglien durch die Sektionsbefunde von Head und Campbell erwiesen sind, ist es wahrscheinlich, daß auch die hyperalgetischen Zonen so aufzufassen sind.

Was die Lage der verschiedenen Hautzonen betrifft, die den Rückenmarkssegmenten oder den Nervenwurzeln entsprechen, mag folgendes[3]) mitgeteilt werden: Wenn wir jede Zone nach den vom Rückenmark ausgehenden Nervenwurzeln benennen, bekommen wir 8 Cervicalzonen, 12 Dorsalzonen, 5 Lumbalzonen und 4 Sacralzonen, welche alle ziemlich rechtwinklig auf der Längsachse des Körpers der Reihe nach von oben nach unten geordnet sind; die Extremitäten denkt man sich rechtwinklig zu der Längsachse des Körpers, wie dies bei den vierfüßigen Tieren der Fall ist, mit dem Daumen nach vorn und den Unterextremitäten etwas verdreht, wie sie in der fötalen Stellung stehen. Jedes Organ kann Hyperalgesie in mehreren Zonen hervorrufen. So können nach Head bei Krankheiten in Aorta und im Herzen Hyperalgesien in der 1. bis zur 8. Dorsalzone auftreten. Bei Krankheiten der Lunge kann man Hyperalgesien in der 3. bis 9. Dorsalzone, bei Leberkrankheiten in der 7. bis 10. Dorsalzone, bei Nierenleiden in der 10. bis 12. und in der 1. Lumbalzone, bei Krankheiten der Blase, der Prostata, Testes, Uterus und Adnexa in den unteren Dorsal- und oberen Lumbalzonen beobachten. Bei den Verdauungskrankheiten endlich treten die Hyperalgesien in der 7. bis 12. Dorsalzone und speziell bei Krankheiten des Magens und im oberen Teile des Dünndarmes in der 7. bis 9., bei Erkrankungen des Darmes in der 9. bis 19. Dorsalzone auf. Die Verdauungsorgane werden indessen nicht nur durch den N. sympathicus, sondern auch durch den N. vagus innerviert und hierauf gründet Head seine Ansicht von dem reflektorischen Kopfschmerz und der reflektorischen Kopfhauthyperalgesie bei Organkrankheiten, und er hat eine Reihe von Kopfzonen beschrieben, welche in bestimmtem Verhältnis zu den Zonen des Truncus stehen.

VIII. Die Empfindungen von Kitzel und Jucken.

Zu den interessantesten Erscheinungen auf dem Gebiete der Hautsinnesphysiologie gehören die Eigentümlichkeiten, welche die Empfindungen von Kitzel und Jucken zeigen. Die großen Schwierigkeiten, die der Erklärung dieser Erscheinungen beim jetzigen Stande unserer Kenntnisse entgegenstehen, deuten darauf hin, daß mehrere von unseren Vorstellungen über den Ablauf und die Verbreitungsweise der Nervenerregung noch zu komplettieren sind. Es ist unter solchen Umständen zu bedauern, daß bisher keine systematischen Untersuchungen über diese Frage durchgeführt wurden. Was bisher vorliegt, sind größtenteils nur zufällige Beobachtungen und theoretische Erörterungen, in denen der betreffende Verfasser sich nicht selten in Widersprüche gegen die eigenen Angaben verwickelt. Obgleich die Empfindungen von Kitzel und diejenigen von Jucken manche Übereinstimmungen zeigen,

[1]) Philos. Transact. of Roy. Soc. London **184**, 190. — [2]) Journ. of Physiol. **27**. — [3]) Nach der Zusammenstellung Fabers, l. c.

zeigt doch die psychologische Analyse mit großer Wahrscheinlichkeit, daß beide als zwei voneinander verschiedene Empfindungsqualitäten zu betrachten sind. Als juckend werden die Empfindungen definiert, welche bei verschiedenen Hautkrankheiten vorkommen oder durch Insektenbisse entstehen, welche aber leicht auch dadurch hervorgerufen werden können, daß eine feine Stecknadel (z. B. Spitzenfläche 0,001 qmm) gegen die Haut mit einer abgepaßten Belastung (z. B. 1 g) drückt. Die dabei entstehende Empfindung ist, wie Alrutz [1]) hervorgehoben hat, typisch juckend. Diese letztere Tatsache zeigt, daß es nicht möglich ist, die von Spezialärzten für Hautkrankheiten ausgesprochene Ansicht zu acceptieren, daß das Jucken (Pruritus) ins Gebiet der Parästhesien gehört, d. h. eine Gefühlsanomalie darstellt, welche keine Steigerung oder Verminderung der Normalbedingungen bedeutet, sondern eine Abart derselben sei, d. h. also ein dem gesunden Körper so gut wie fremdes Gefühl (Jeßner [2]).

Als kitzelnd werden die Empfindungen bezeichnet, welche an behaarten Hautstellen entstehen, wenn man darüber sehr leicht, z. B. mit einer Feder, hinstreicht, wobei es häufig genügt, daß nur die Haare getroffen werden; dazu zu rechnen sind auch die Empfindungen, welche an unbehaarten Stellen, z. B. an den Lippen, und zwar unter denselben Reizbedingungen wie an behaarten Hautteilen auftreten. Eine kitzelnde Empfindung entsteht aber auch bei kräftigem Drucke auf die Fußsohle, gegen die Rippen usw. Hier erhebt sich die Frage, ob nicht diese tiefen Kitzelempfindungen von den oberflächlichen ganz verschieden sind, wie Stanley Hall und Allin [3]) meinen.

Gegen die scharfe Unterscheidung zwischen den juckenden und den kitzelnden Empfindungen könnte man den Einwand machen, daß es Empfindungen gibt, bei welchen es schwierig ist, zu sagen, ob sie als juckend oder kitzelnd anzusehen sind. Diese Tatsache ist jedoch keineswegs entscheidend. Möglicherweise sind nämlich die betreffenden Empfindungen Mischempfindungen, welche die Zusammengehörigkeit der Kitzel- und Juckempfindungen nicht mehr beweisen als z. B. die Existenz von Mischempfindungen von Druck und Wärme die Zusammengehörigkeit dieser Empfindungen.

Man hat sich früh gefragt, in welchem Verhältnis die Empfindungen von Jucken und Kitzel zu den übrigen Hautempfindungen stehen. Man steht vor der Alternative, ob die juckenden und kitzelnden Empfindungen mit den anderen Hautempfindungen gleich geordnet sind, in welchem Falle man sich gern besondere Nerven mit den spezifischen Energien der Juck- bzw. Kitzelempfindlichkeit denken würde, oder ob sie irgendwelche Modifikationen anderer Hautempfindungen sind, wobei natürlich nur die Druck- und Schmerzempfindungen in Frage kommen können.

Die meisten Forscher haben sich für die letztere Möglichkeit ausgesprochen, wenigstens was die Kitzelempfindungen betrifft. (Doch scheinen die meisten nicht den hier hervorgehobenen strengen Unterschied zwischen kitzelnden und juckenden Empfindungen anzuerkennen und im allgemeinen den Begriff „Kitzel“ etwas weiter als hier gefaßt zu haben.)

---

[1]) Undersökningar öfver smärtsinnet, p. 10—14, Upsala 1901. Da eine Historik der juckenden und kitzelnden Empfindungen. — [2]) Pathologie und Therapie des Hautjuckens, 1. Tl., S. 4, Würzburg 1900. — [3]) Amer. Journ. of Physiol. 9, 10—11, 1897.

Schon Weber[1]) glaubt z. B., daß die kitzelnden Empfindungen dadurch entstehen, daß die Erregung auf angrenzende Teile ausstrahlt, wofür die Beobachtung spricht, daß die Empfindung den Reiz beträchtlich überdauert, ja daß sie bisweilen nachher kräftiger werden kann. Weber hebt auch den großen Unterschied verschiedener Stellen hervor, indem gewisse Teile sehr kitzlich und andere es so gut wie gar nicht sind, und nach Dohrn[2]) wären vielleicht diese überdauernden Empfindungen von lokalen vasomotorischen Reflexen abhängig; für diese Annahme führt er an, daß eine juckende Stelle gewöhnlich etwas gerötet ist. Auch Funcke[3]) schließt sich der Auffassung Webers an, daß die Kitzelempfindung eine sekundäre Folge der primären Berührungsempfindung ist, hebt aber als eigentümlich und bemerkenswert hervor, daß schwache Reize diese Ausstrahlungen hervorrufen, starke aber nicht.

Auch Goldscheider[4]), der den Drucknerven das Vermögen, Schmerz auszulösen, zuschreibt, schreibt diesen auch die kitzelnden Empfindungen zu. Er teilt einige Beobachtungen über Momente mit, welche das Kitzeln auslöschen. Sticht man mit einer Nadel oder einem spitzen Hölzchen in irgend einen Punkt der Haut ein, so ist unmittelbar darauf selbst nach mäßigem Druck in einem gewissen Umkreise die Haut unfähig, Kitzel wahrzunehmen. Die Größe dieses Bezirks wächst mit der Stärke des angewendeten Druckes, ebenso hängt hiervon sowie von der individuellen Disposition der Hautregion für Kitzelreize die Zeitdauer der Unempfindlichkeit für Kitzelreize ab. Auch die Druck- und Schmerzempfindlichkeit in der Umgebung ist etwas abgestumpft. Goldscheider findet diese exzentrische Anästhesierung in zentralen Vorgängen begründet. Die zentrale Erregung soll sich auf einen gewissen Umkreis erstrecken, in welchem infolgedessen schwächere Erregungen unter der Bewußtseinsschwelle gehalten werden. Für die Lokalisation der Erscheinung im Zentrum spricht auch die Umkehrung des Versuches: Streicht man leise über ein Gebiet der Haut, so daß ein nachdauerndes Kitzelgefühl entsteht, und reizt nun in der Mitte der gereizten Stelle nur mäßig einen Punkt, so ist in demselben Moment das nachdauernde Gefühl verschwunden.

Auch v. Frey[5]) scheint dieser Auffassung der Beziehung des Kitzels zum Drucksinn zu huldigen; er faßt also den Kitzel nicht als eine primäre Empfindung auf, sondern als eine sekundäre im Sinne von H. Quincke. In derselben Weise dürfte man auch die juckenden Empfindungen in Beziehung zu den Stechschmerzempfindungen bringen können. Es ist in der Tat wahrscheinlich, daß der juckende Charakter, wenn man von seinem unbehaglichen Gefühlston absieht, eben durch den hingezogenen Verlauf der Sensation — jeder kleinste Zeitwert der juckenden Sensation ist eine Stichsensation — ihre Irradiation und Tendenz, Reflexe auszulösen, konstituiert wird.

Vieles bleibt jedoch vorläufig unerklärt. Wodurch ist der so auffällige Gefühlston der kitzelnden und juckenden Empfindungen bedingt? Weshalb

---

[1]) Wagners Handwörterb. 3, 2. Abteil., 493; siehe auch die Beobachtungen S. 495, 515, 566 bis 567, 578 bis 579. — [2]) Zeitschr. f. rat. Med. 10, 339, 1861. — [3]) Hermanns Handb. 3, 2. Abteil., 313 bis 314. — [4]) Siehe die etwas wechselnden Meinungen dieses Verfassers: Ges. Abh., S. 45 bis 46, 81 bis 84, 202 bis 205, 259, 262, 269; ebenso: Über den Schmerz, Berlin 1894, S. 31. — [5]) Leipz. Abh. 1896, S. 217; siehe auch Leipz. Mitteil. 1894, S. 192 und 286.

verschwindet der juckende und kitzelnde Charakter bei vermehrter Reizung? Ohne eingehende Untersuchungen können diese und andere hierher gehörige Fragen nicht beantwortet werden[1]).

Gegen die oben entwickelte Auffassung der kitzelnden und juckenden Empfindungen hat Alrutz[2]) sich ausgesprochen. Nachdem er gefunden hatte, daß es alle Übergänge zwischen den kitzelnden und juckenden Empfindungen gibt, und daß reine kitzelnde Empfindungen von den Feldern zwischen den Druckpunkten ausgelöst werden, schließt er, daß die Drucknerven die Kitzelempfindungen nicht vermitteln. Er nimmt an, daß es besondere Nerven gibt, welche die juckenden und kitzelnden Empfindungen auslösen und welche weder mit den Druck- noch mit den Schmerznerven identisch sind. Gegen die Beweiskraft der Gründe, welche für die Auffassung als Übergangsempfindungen angeführt werden, ist schon oben hervorgehoben worden, daß es sich vielleicht nur um Mischempfindungen handelt, welche durch gleichzeitige Reizung der Druck- und Schmerznerven entstanden zu denken sind. Übrigens wäre es möglich, daß es an verschiedenen Schleimhäuten, an der Cornea undifferenzierte Druck-Schmerznerven gibt, welche auch juckend-kitzelnde Empfindungen auslösen. Die Beobachtung, daß die Zwischenfelder der Druckpunkte kitzelnde Empfindungen auszulösen vermögen, ist nur beiläufig mitgeteilt. Wenn sie bestätigt wird, ist sie jedoch von größtem prinzipiellen Gewicht für die hier erörterten Fragen.

IX. Zusammengesetzte Hautempfindungen und ihre Analyse.

Die verschiedenen Arten von elementaren Hautempfindungen werden häufig zur selben Zeit von einer und derselben Hautstelle ausgelöst, und es entstehen nunmehr Mischempfindungen.

Daß bei intensiveren Kältereizen die Kälteempfindung sich mit einer Schmerzempfindung vermischt, ist ja allbekannt, und in derselben Weise entsteht bei intensiver Wärme- resp. Druckreizung der Wärme- resp. Druckschmerz. Wenn man z. B. einen schmerzhaften Druck mit einem mäßig kalten resp. einem mäßig warmen Gegenstand ausübt, setzt sich die entstehende Empfindung aus drei Einzelempfindungen zusammen (Wärme-, Druck-, Schmerzempfindungen, — Kälte-, Druck-, Schmerzempfindungen), was ja keiner Erklärung bedarf.

Bemerkenswert ist, daß häufig an derselben Hautstelle die Wärme- und die Kältenerven zur selben Zeit gereizt werden können. Man erreicht dies durch Anwendung von Wärmereizen solcher Intensität, daß sie auch die Kältenerven paradox erregen. Die dabei entstehende Empfindung hat besonders Alrutz[3]) untersucht. Sie hat nach ihm einen spezifischen Charakter und wird von ihm „Hitzeempfindung“ genannt. Gemäß ihrer Entstehungsweise kann diese Hitzeempfindung nur von Hautstellen ausgelöst werden, welche sowohl Kälte- wie Wärmeempfindlichkeit besitzen: ein Reizmittel von einer Temperatur, durch welche an gewöhnlichen Hautstellen Hitzeempfindung ausgelöst wird, erzeugt an einer Hautstelle, welche nur Kälteendorgane hat,

[1]) Siehe Thunberg, Skand. Arch. f. Physiol. **12**, 440, 1901. — [2]) Undersökningar öfver smärtsinnet, Upsala 1901, p. 89. — [3]) Skand. Arch. f. Physiol. **10**, 340, 1900.

nur eine paradoxe Kälteempfindung, an einer Hautstelle, welche ausschließlich Wärmeendorgane besitzt, nur eine gewöhnliche Wärmeempfindung.

Alrutz ist weiter der Ansicht, daß die Hitzeempfindung eine ganz eigenartige Temperaturempfindung ist, welche für die Psyche ganz einfach ist und introspektiv nicht in Komponenten zerlegt werden kann. Gegen diese scharfe Abgrenzung der fraglichen Empfindung sind vom Verfasser [1]) Einwendungen erhoben worden. Bei gleichzeitiger und an derselben Stelle lokalisierter Reizung der Kälte- und Wärmenerven dürfte nämlich die überwiegende Sensation immer als solche apperzipiert werden, und dasselbe beobachtet man auch nach einiger Übung bezüglich der schwächeren, wenn sie nur nicht so minimal ist, daß sie überhaupt keinen Einfluß ausübt oder der Empfindung nur eine unbedeutend andere Färbung gibt. Nach dieser Auffassung wird also bei allmählich wachsender Wärmereizung die reine Wärmeempfindung, wenn die Kältenerven schwach gereizt werden, zunächst etwas anders gefärbt, doch so, daß die Wärmeempfindung ganz deutlich dominiert; bei noch intensiverer Reizung ist es allmählich möglich, auch die jetzt hervortretende paradoxe Kälteempfindung wahrzunehmen, was aber nicht hindert, daß die Mischempfindung die ihr eigentümliche Färbung zeigt [2]).

Zusammengesetzte Empfindungen, in welchen auch Hautempfindungen enthalten sind, sind die Empfindungen von Glätte und Rauhigkeit. Eine Erörterung der Bedingungen für die Entstehung dieser Empfindungen zeigt, welches die eingehenden Komponenten sind.

Durch die einfache Berührung eines Gegenstandes mit einer wenn auch noch so empfindlichen Hautstelle, z. B. einer Fingerspitze, erhält man keine Vorstellung von dem Grade von Glätte oder Rauhigkeit, der die Oberfläche des Gegenstandes auszeichnet. Nimmt man eine Reihe von Gegenständen, deren Oberflächenbeschaffenheit beträchtlich differiert, z. B. Sandpapier, verschiedene Zeuge, Papier von verschiedener Rauhigkeit, Metallblech usw., so findet man, wenn man damit nur die Haut berührt oder mit der Haut sie berührt, daß man auf diese Weise nur sehr grobe Differenzen beobachten kann. Erst wenn man, während z. B. die Fingerspitze die Oberfläche berührt, den Finger über die Fläche verschiebt, oder wenn man, bei Ruhelage der Fingerspitze, den berührenden Gegenstand verschiebt, hat man die günstigen Bedingungen für eine wirkliche Auffassung des Charakters der Oberfläche. Die Sensation setzt sich also aus einer gleichförmigen Berührungsempfindung und einer Empfindung der mit Leichtigkeit gleichzeitig vor sich gehenden Verschiebung der Tastfläche gegenüber einem Gegenstande zusammen, also teils aus einer Hautempfindung, teils aus einer Empfindung aus dem Gebiete des Muskelsinnes. Je gleichförmiger die Berührungsempfindung ist und je leichter die Verschiebung der Tastfläche vor sich geht, um so höher schätzen wir die Glätte des Gegenstandes; je weniger diese Bedingungen erfüllt sind, um so rauher erscheint uns die Oberfläche.

Diese Auffassung wird durch die Analyse einer eigentümlichen Täuschung von Glätte bestätigt [3]). Wenn man nämlich bei vorgestreckten Armen die beiden Hände an beide Seiten eines vertikalen Metalldrahtnetzes so hält, daß

[1]) Skand. Arch. f. Physiol. **11**, 415, 1901. — [2]) Siehe auch die Bemerkungen Kiesows, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **26**, 231, 1901. — [3]) Thunberg, Upsala Läkaref. förh. **8**, 660, 1902/03.

die Volarseite der Hände und Finger durch die Netzmaschen einander berühren, und wenn man dann die Hände zurückzieht, so daß sie also über das Drahtnetz hingleiten, unter Beibehaltung der gegenseitigen Lage, so hat man ein eigentümliches, beinahe öliges Gefühl von starker Glätte. Bei dieser Illusion von Glätte werden diese konstituierenden Empfindungen ausgelöst, obgleich kein glatter Gegenstand da ist. Die kontinuierliche, gleichförmige Berührungsempfindung entsteht dadurch, daß der größere Teil der Hände und der Finger — die Stellen, die von den Metalldrähten nicht geschieden werden — gleichförmig einander berühren, und das Gefühl der Verschiebung tritt auf, wenn die Metalldrähte der Haut entlang gleiten. Von einander nahe liegenden Hautstellen ausgelöst, schmelzen diese Empfindungen zusammen zu einer Empfindung von Glätte.

Die Empfindungen von Nässe und Trockenheit sind nicht elementare Empfindungen, sondern Schlüsse, welche in verschiedener Weise aufgebaut werden können, wobei auch Muskel- und Gesichtsempfindungen in wechselnder Weise mitspielen können. Eine Kälteempfindung, welche von einer Berührungsempfindung nicht begleitet ist, wird häufig als von einer Flüssigkeit verursacht aufgefaßt, was daraus erklärt werden kann, daß beim Niedertauchen eines Körperteiles in eine Flüssigkeit der Drucksinn fast gar nicht erregt wird, daß also die entstehenden Temperaturempfindungen ungemischt sind. Im Zusammenhang damit steht eine eigentümliche Illusion von Nässe, welche entsteht, wenn man die Stirn mit einem sehr kalten Gegenstande z. B. 20 Sek. berührt. Nach dessen Fortnahme dauert die Kälteempfindung noch einige Zeit fort und zugleich hat man den Eindruck, daß die Stirnhaut deutlich naß sei.

X. Die Apperzeptionszeiten der Hautempfindungen.

Die Hautempfindungen verschiedener Qualität werden unter sonst vergleichbaren Umständen ungleich schnell perzipiert, wie durch Reaktionszeitversuche festgestellt ist. Für dieselben Körperregionen sind erstens die Temperaturreaktionszeiten länger als die Druckreaktionszeiten — und zweitens die Wärmereaktionszeiten länger als die Kältereaktionszeiten (Herzen, Stern, Ewald und Rosenbach[1]) und besonders Tanzi[2]), Goldscheider[3]), v. Vintschgau und Steinach[4]).

Zum Vergleich zwischen Kälte- und Wärmereaktionszeiten mag folgende Tabelle I (s. f. S.), welche die Reaktionszeit in Sekunden angibt, mitgeteilt werden. Die Reaktionszeiten der Temperaturempfindungen sind im übrigen sehr wechselnd und erfahren im allgemeinen durch Schwäche des Reizes, Dicke der Epidermis, mehr oder weniger schlecht entwickelten Temperatursinn eine wesentliche Verlängerung.

Folgende Tabelle II zeigt nach v. Vintschgau und Steinach das Verhältnis der Reaktionszeiten einerseits für Druckempfindungen, anderseits für Wärme- und Kälteempfindungen.

---

[1]) Genaueres über ihre Versuche siehe bei Dessoir: Über den Hautsinn, Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1892, S. 316. — [2]) Tanzi, Sulle sensazioni del freddo e del caldo, Milano-Torino 1886, zitiert nach Schäfers Textbook, 1900. — [3]) Ges. Abh. 1, 312. — [4]) Pflügers Arch. 43, 152, 1888.

Tabelle I.

Körperregion	Goldscheider		v. Vintschgau		Steinach	
	Wärme 49 bis 50°	Kälte 14 bis 15°	Wärme 48 bis 49°	Kälte 2 bis 6°	Wärme 48 bis 49°	Kälte 2 bis 6°
Gesicht	0,190	0,135	—	—	—	—
Rechte Seite des Gesichts	—	—	0,160	0,152	0,124	0,115
Linke Seite des Gesichts	—	—	0,170	0,161	0,142	0,120
Obere Extremität .	0,270	0,150	—	—	—	—
Carpalgegend . . .	—	—	0,205	0,186	0,173	0,152

Tabelle II.

Körpergegend	Wärme 48 bis 49°	Druck	Unterschied	Kälte	Druck	Unterschied
Rechte Schläfe	0,166	0,119	0,047	0,160	0,119	0,041
Linke Schläfe .	0,154	0,119	0,035	0,143	0,19	0,024
Antithenar . .	0,208	0,126	0,082	0,206	0,126	0,080

Die Bedeutung der Reizweise zeigt sich deutlich in den Untersuchungen Tanzis. Während in den bisher erwähnten Versuchen der Temperaturreiz durch Berührung mit einem festen Gegenstande von bestimmter Temperatur angebracht wurde, verwendete er als Temperaturreizmittel eine Flamme resp. Äther, oder er berührte die Haut mit warmen resp. kalten Metallscheiben. Als Mittelwert von vier verschiedenen Versuchspersonen und 30 Reaktionsversuchen für jede von diesen erhielt er bei der ersten Versuchsanordnung Kälte (beinahe schmerzhaft) 0,227 Sek., Wärme (beinahe schmerzhaft) 0,507 Sek., Wärme (schwach) 1,160 Sek. Bei der letzteren Versuchsanordnung waren die Mittelwerte von vier Versuchsindividuen aus je 50 Versuchen: Kälte 0,137, Wärme 0,162, einfache Berührung 0,129. Die Zeiten sind also, was die Temperaturempfindungen betrifft, viel kürzer als im vorigen Falle.

Daß die Temperaturempfindungen eine längere Reaktionszeit als die Druckempfindungen haben, muß wenigstens zum Teil durch die Zeit bedingt sein, welche vergeht, ehe der Temperaturreiz durch Leitung zu den Schichten der temperaturempfindlichen Organe gedrungen ist. In Übereinstimmung mit dieser Deutung steht auch die Tatsache, daß der Unterschied größer an Hautstellen ist, deren Epidermis sehr dick ist. Die durchgehend längere Reaktionszeit der Wärmeempfindungen ist durch die wahrscheinlich tiefere Lage der Wärmeendorgane bedingt.

Die bisherigen Angaben der Apperzeptionszeiten der Temperaturempfindungen beziehen sich auf die Verhältnisse der Kälteendorgane bei Kältereizung und der Wärmeendorgane bei Wärmereizung. Da man indessen durch dasselbe Wärmereizmittel sowohl die Wärmenerven wie die Kältenerven (paradox)

reizen kann, entsteht auch die Frage nach dem gegenseitigen Verhältnis im Auftreten der so entstandenen Temperaturempfindungen. Es hat sich gezeigt, daß hier kein konstantes Verhältnis besteht. Je nach dem Wärmebestand der Haut und der Beschaffenheit des verwendeten Reizes erfordert die Apperzeption der paradoxen Kälteempfindung kürzere oder längere oder dieselbe Zeit wie die durch denselben Reiz ausgelöste Wärmeempfindung. Es hängt das zweifellos von der entgegengesetzten Wirkungsweise der beiden konkurrierenden Faktoren ab. Für eine kürzere Apperzeptionszeit der Kälteempfindungen wirkt die oberflächlichere Lage der Kälteendorgan begünstigend, dieser Vorteil wird aber durch ihre höhere Schwelle zum Teil kompensiert [1]).

Die Reaktionszeiten der Schmerzempfindungen zeigen große Verschiedenheiten. Häufig sind sie sehr groß, größer als überhaupt die Reaktionszeit irgend einer anderen Empfindung. In manchen Versuchen kann dies dadurch bedingt sein, daß der Reiz sehr langsam anschwillt, so daß eine nicht unwesentliche Zeit vergeht, bis der Schwellenwert für Hervortreten einer Schmerzempfindung erreicht ist. Aber auch wenn der Reiz momentan diesen Schwellenwert erreicht, ist die Apperzeptionszeit sehr groß, wie schon lange bekannt ist. Stößt man z. B. beim Gehen mit einer empfindlichen Zehe gegen einen Stein, so tritt der Schmerz regelmäßig merklich später ein als die Tastempfindung [2]). Übt man mit einer Nadel einen momentanen Druck gegen die Haut aus, so hat man bei gewisser Stärke des Reizes außer der ersten sofort eintretenden Druckempfindung nach einem empfindungslosen Intervall eine Stechschmerzempfindung (Goldscheider [3]). In dem ersten Falle handelt es sich sicher um den dumpfen Schmerz, im letzten um den stechenden. Beide zeigen also trotz momentanen Auftretens eines maximalen Reizes eine ganz deutlich längere Apperzeptionszeit als die Druckempfindung. Die Reaktionszeit der stechenden Empfindungen beträgt bei schwachen, aber momentan vorhandenen mechanischen und thermischen Reizen ungefähr 1,3 Sekunden [4]). Wenn man die Stärke des Reizes erhöht, wird bei Anwendung momentan auftreffender thermischer und mechanischer Reize die Reaktionszeit der Stechempfindung bei einer bestimmten Größe des Reizes plötzlich sprungweise erniedrigt. Von der ursprünglichen Zeitdauer von etwas mehr als 1 Sekunde sinkt sie plötzlich auf ungefähr nur $^{40}/_{100}$ Sekunden oder noch weniger, aber auch die Stechempfindung mit der längeren Apperzeptionszeit bleibt bestehen. Man bekommt also bei einer einzelnen momentanen Hautreizung zwei stechende Empfindungen.

Dies Phänomen der zwei zeitlich getrennten Schmerzempfindungen bei einer einzigen Reizung ist von Goldscheider und Gad [5]) mit dem Phänomen einer ersten Druckempfindung und einer nachfolgenden Schmerzempfindung, das bei etwas schwächerer Reizung häufig entsteht, in Zusammenhang gebracht. Sie nennen die spätere dieser Empfindungen die sekundäre und denken sich ihre Entstehung in folgender Weise auf einer Summierung beruhend. Die Berührungs- und Schmerzempfindungen werden ihrer Ansicht nach durch

---

[1]) Siehe Thunberg, Skand. Arch. f. Physiol. **11**, 419, 1901. — [2]) Funcke, Hermanns Hdb. **3**, 2. Abteil., 300. — [3]) Ges. Abh. S. 44. — [4]) Siehe Thunberg, Skand. Arch. f. Physiol. **12**, 394, 1901. — [5]) Ges. Abh. **1**, 397.

dieselben Nerven der Haut vermittelt. Diese Nerven teilen sich im Rückenmark in zwei Bahnen, deren eine direkt zu dem Zentrum für die Druckempfindungen geht. Eine Reizung der Haut bewirkt also auf diesem Wege eine Berührungsempfindung. Zum Teil wird aber der Reiz auch auf der zweiten Bahn im Rückenmark nach dessen grauer Substanz fortgeleitet und trifft dort auf Zellen, die vorderhand nur in einen veränderten Reizbarkeitszustand versetzt werden. Erst wenn mehrere Reize nacheinander auf diese Weise die Zelle erreicht haben — schon ein einziger mechanischer Hautreiz ruft mehrere solche zentripetalen Nervenerregungen hervor — wird die angehäufte Energie in Arbeit umgesetzt, und die Zelle sendet nun selbst einen Reiz aus, der auf seinem besonderen Wege das Gehirn erreicht und dort eine Schmerzempfindung hervorruft. Weil also eine Summierung von Reizen in dieser Bahn stattfindet, nannten sie dieselbe die Summierungsbahn.

Diese Deutung erklärte nur das Phänomen, daß einer primären Berührungsempfindung nach einem empfindungslosen Intervall eine Schmerzempfindung folgt. Durch die Annahme, daß ein einziger Reiz von genügender Stärke imstande ist, durch die Summierungsbahn durchzubrechen, erklären sie die Tatsache, daß schon die primäre Sensation eine Schmerzempfindung sein kann. Nachdem die Existenz besonderer Schmerznerven durch die Entdeckung der Schmerzpunkte sehr wahrscheinlich gemacht ist, wird die Deutung dieses Phänomens anders.

Das Phänomen einer ersten Berührungsempfindung, von einer spät kommenden Schmerzempfindung begleitet, kann nicht dieselbe Erklärung wie das Phänomen zweier nacheinander folgender Schmerzempfindungen haben. Daß ein momentaner Nadelstich erst eine Druckempfindung, dann eine Schmerzempfindung gibt, wird durch die größere Trägheit des Schmerzorgans verursacht, wie v. Frey durch eine Analyse der Resultate zeigte, die man bei Reizung der verschiedenen Sinnespunkte erhält. Nur wenn ein Druck- und ein Schmerzpunkt nahe aneinander liegen, treten die beiden Empfindungen auf. An frei liegenden Druckpunkten bekommt man nur die zuerst kommende Druckempfindung, die Stechempfindung aber bleibt aus [1]). An frei liegenden Schmerzpunkten beobachtet man dagegen nur das Phänomen, daß bei stärkerer momentaner Reizung zwei nacheinander kommende Stechempfindungen entstehen, und dies kann in der Weise erklärt werden, daß eine gleichzeitige Reizung der Nerven und der Nervenenden stattfindet. Die erste leitet die Erregung augenblicklich zentralwärts, die letztere erst nach ihrer bestimmten Latenzzeit (Thunberg [2]).

XI. Die Lokalisation der Hautempfindungen [3]).

Lokalzeichen. Orts- oder Raumsinn. Um eine Hautempfindung, ebenso wie die meisten anderen Empfindungen, eindeutig zu charakterisieren, muß man ihre Qualität, ihre Intensität, ihre Lokalisation und ihre Lage in der Zeit angeben. Man kann dies auch so ausdrücken, daß die fraglichen Empfindungen nicht nur Qualität und Intensität als feste Eigenschaften oder

[1]) Leipziger Abh. 1896, S. 243. — [2]) Skand. Arch. f. Physiol. 12, 432, 1901. — [3]) Eine eingehende kritische Literaturzusammenstellung mit eigenen Untersuchungen liefert V. Henri, Über die Raumwahrnehmungen des Tastsinnes, Berlin 1898.

Attribute haben, sondern auch ein Etwas, was ihre Lage im Raum, ebenso wie ein anderes Etwas, was ihre Lage in der Zeit bestimmt. Was einer Hautempfindung ihren bestimmten Ort in dem räumlichen Vorstellungsbild unserer Körperoberfläche gibt, nennt man häufig nach Lotze[1]) ihr Lokalzeichen. Unsere Fähigkeit, die Hautempfindungen zu lokalisieren, bezeichnet man kurz als den Ortssinn oder Raumsinn der Haut. Da jedoch der Ausdruck Orts- oder Raumsinn irreleiten kann, wird er im folgenden nicht angewendet. Es wird also nicht von einem feineren oder gröberen Orts- oder Raumsinn die Rede sein, sondern von einer feineren oder gröberen Lokalisation der Empfindungen oder von einem mehr oder weniger ausgebildeten Vermögen, die Empfindungen zu lokalisieren.

Das Wort „Sinn" scheint sowohl in der Sprache des täglichen Lebens wie in der Fachsprache einer schärferen Präzision zu entbehren. Von den verschiedenen Bedeutungen, die ihm zukommen, hat man wohl im allgemeinen in der Sinnesphysiologie beim Gebrauch des Begriffes „Sinn" den Zweck maßgebend sein lassen, die Empfindungen dadurch zu klassifizieren, so daß jede einfache Empfindung ihren Platz innerhalb eines gewissen Sinnes, und nur innerhalb dieses hat.

Wenn man die physiologische Bedeutung dieses Ausdruckes durch diese Definition festlegt, hat der Ausdruck Ortssinn keine Existenzberechtigung, denn es bleiben überhaupt keine Empfindungen übrig, welche ausschließlich als Funktionen eines „Ortssinnes" gelten könnten. Es gibt ja keine Empfindungen, die nur Ortsempfindungen sind. Bei dem Ausdruck Ortssinn ist eine den meisten Empfindungen zukommende Eigenschaft — die Lokalisation — herausgegriffen und als Anlaß zur Konstruktion eines besonderen Sinnes benutzt worden. Das für die anderen Sinne maßgebende Prinzip der Einteilung und Definition ist also verlassen, und es werden nicht direkt vergleichbare Begriffe (wie Drucksinn und Ortssinn) einander gleich geordnet.

Die noch vielfach gangbare Annahme, es existiere ein besonderer Ortssinn der Haut, rührt von Weber[2]) her, der den Tastsinn nach drei Gesichtspunkten auflöste und Temperatursinn, Drucksinn und Ortssinn unterschied. Auch Lotze scheint eine der Weberschen ähnliche Vorstellung gehabt zu haben. Für Lotze war nämlich das Lokalzeichen eine zweite Empfindung, die zur selben Zeit als die Haut- bzw. Gesichtsempfindungen entstand, also nicht einfach ein bloßes Moment dieser Empfindungen bildete, welches seiner Natur nach aufs innigste und integrierend mit der Qualität der Empfindung verknüpft sein mußte, wie besonders Stumpf[3]) hervorgehoben hat. Doch scheint Lotze seine ursprüngliche Fassung des Lokalzeichens später etwas verändert zu haben.

Für die Erklärung unseres Vermögens, eine Hautempfindung an den Ort des Reizes zu lokalisieren, muß man annehmen, daß bei Erregung der Elemente der zugehörigen nervösen Zentren im Gehirn irgend welche Faktoren mitspielen, welche den psychischen Effekt der Erregung des einen Elementes von dem Effekt der Erregung eines anderen verschieden machen. Jedes

---

[1]) Medizinische Psychologie, Leipzig 1852, S. 331. — [2]) Wagners Handwb. 3, 2. Abteil., 511. — [3]) Siehe Stumpf, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 4, 70, 1893.

Element hat also sein eigenes Individual- oder Spezialzeichen, das für die Lokalisation der Hautempfindungen innerhalb des räumlichen Vorstellungsbildes unserer Körperoberfläche verwendet wird. Dies Individualzeichen der Elemente in den empfindenden Zentren muß nach dem Gesetz der exzentrischen Projektion durch das Bewußtsein als eine Eigenschaft der Nervenenden gelten, und demgemäß spricht man von dem Lokalzeichen der Nervenenden. Da der Ausdruck Lokalzeichen etwas zu viel zu sagen scheint, hat v. Frey [1]) die Bezeichnung Merkzeichen vorgeschlagen: denn man ist zwar imstande, zwei von benachbarten Nervenenden ausgelöste sonst identische Druckempfindungen zu unterscheiden, kann aber dabei ihre gegenseitige Lokalisation nicht wahrnehmen. Es mag indessen hervorgehoben werden, daß dabei der Unterschied immer doch als ein Ortsunterschied wahrgenommen wird.

Die Untersuchungen der Feinheit unseres Lokalisationsvermögens sind im allgemeinen in der Weise angestellt worden, daß man Schwellenwerte der Lokalisationsfähigkeit bestimmt hat. Man hat dabei gefunden, daß die Schwellenwerte bei verschiedenen Untersuchungsmethoden sehr verschieden ausfallen, und daß man derer mehrere unterscheiden muß. Man kann sie in zwei Gruppen verteilen.

I. Simultanschwellen. Wenn man eine Hautstelle mit zwei Spitzen von veränderlicher Distanz zu derselben Zeit berührt, bekommt man entweder den Eindruck einer einzigen berührenden Spitze oder den eines Gegenstandes von erkennbarer Größe, dessen Richtung man auch vielleicht erkennen kann, oder endlich von zwei Spitzen. Bestimmt man die kleinsten Spitzendistanzen, bei denen jeder dieser verschiedenen Eindrücke sich einstellt, so erhält man, der Benennung Fechners [2]) folgend, teils die Schwelle der erkennbaren Größe mit oder ohne Richtungserkennung (im ersten Falle = simultane Richtungsschwelle v. Freys), teils die Schwelle der erkennbaren Distanz oder Duplizität (= simultane Duplizitätsschwelle, scheint immer mit Richtungserkennung verbunden zu sein).

II. Successivschwellen. Wenn man zuerst einen Punkt der Haut berührt, nachher entweder denselben oder einen anderen, so findet man, daß eine gewisse Distanz zwischen den zwei Punkten liegen muß, wenn die Versuchsperson unterscheiden soll, ob ein anderer oder der gleiche Punkt bei der zweiten Reizung getroffen ist. Diese kleinste Distanz gibt die Successivschwelle für die einfache Unterscheidung von Orten auf der Haut (= Successivschwelle v. Freys). Wenn die Versuchsperson die gegenseitige Richtung der zwei Punkte eben bemerken kann, spricht man von der Successivschwelle mit Richtungserkennung.

Die Untersuchungsmethoden. I. Die Bestimmungen der Simultanschwellen sind nur in der Weise ausgeführt worden, daß man die Haut mit zwei Spitzen von wechselnder Distanz berührte, worauf die Versuchsperson den Eindruck zu beschreiben hatte: sie hatte anzugeben, ob eine oder zwei Spitzen, ob Größe oder Richtung erkennbar waren oder nicht? (Methode an-

[1]) Würzburg. Ber. 1902, S. 57. — [2]) Elemente der Psychophys. **1**, 245, 1860.

gegeben von Weber[1]). Die Bestimmung der Successivschwellen ist in zwei verschiedenen Weisen ausgeführt worden. II. Entweder berührt man eine Hautstelle mit einer Spitze und läßt nachher die Versuchsperson, die die Berührung fühlte, aber nicht sah, die berührte Stelle mit einer Spitze anzeigen (Weber[2]). III. Oder auch man macht nach einer ersten Berührung eine neue, die entweder denselben oder einen anderen Punkt trifft. Die Versuchsperson hat nur anzugeben, ob der erstberührte Punkt bei der zweiten Berührung getroffen wird oder nicht oder wo die zweite Berührung erfolgte (Czermak[3]), Goltz[4]), Judd[5]).

Wie die Analyse zeigt, sind diese Methoden einander recht ungleich. In der Methode II, wie sie im allgemeinen ausgeführt wird, wird man bei der Lokalisation von dem Erinnerungsbilde einer Berührung geleitet. Die Versuchsperson soll jetzt mit Hilfe ihres Gesichtssinnes und ihres Muskelsinnes mit einer Spitze einen Punkt treffen und setzt auch die Spitze auf einen Punkt nieder. Es ist dabei möglich, daß sie nach diesem Niedersetzen der Spitze bemerkt, daß die jetzt entstehende Berührungsempfindung mit der vorigen nicht identisch war. Man kann sie dann entweder den Versuch fortsetzen lassen, bis sie glaubt, den richtigen Punkt sicher getroffen zu haben, oder man kann auch bei dem zuerst erhaltenen Werte bleiben. Im ersten Falle ist der erhaltene Wert mehr ein Ausdruck des Vermögens, eine Berührungsempfindung im Vorstellungsbild unserer Körperoberfläche zu lokalisieren, im zweiten Falle bezeichnet er die Fähigkeit, einen Punkt durch die Berührungsempfindungen zu identifizieren; indessen tritt weder die eine noch die andere Funktion in dieser Methode ganz rein heraus. In beiden Fällen ist der Betreffende ja durch das Erinnerungsbild geleitet, nicht durch einen dauernden Eindruck, und wenn es der Versuchsperson erlaubt ist, den Versuch zu wiederholen, nachdem sie die Nichtidentität des zu treffenden und des getroffenen Punktes bemerkt hat, so ist bereits eine neue Empfindung von dem unrichtig getroffenen Punkte ausgelöst worden und kann den Versuch erschweren. Diese Umstände machen die Resultate der Methode nicht ganz rein. Schlechte Resultate brauchen nicht in einem wenig ausgebildeten Lokalisationsvermögen ihre Wurzel zu haben, sondern können durch schnelles Verschwinden der Erinnnerungsbilder verursacht werden oder durch Schwierigkeiten, die nötigen Bewegungen in der Eile sicher auszuführen.

In der Methode III ist es zwar ein Erinnerungsbild, das die Versuchsperson leitet; indessen kann die zweite Berührung, deren Identität oder Nichtidentität mit der ersten herausgefunden werden soll, so schnell wie überhaupt wünschenswert nach der ersten gemacht werden; es liegt hier also keine Gefahr vor, daß das Erinnerungsbild verbleichen könnte. Die Versuchsperson hat übrigens nur ihren Eindruck mitzuteilen und braucht keine abgepaßte Bewegung zu machen, so daß das Versuchsergebnis durch diese Komplikation nicht getrübt werden kann. Das letzte gilt auch für Methode I, bei der es auch nur auf den Eindruck der Versuchsperson ankommt und keine

---

[1]) Annotationes anatomicae et physiologicae 1834 (1829), p. 44; s. Wagners Handwb. d. Physiol. **3**, 2. Abteil., 524 f. — [2]) Sitzungsber. d. sächs. Ges. d. Wissensch. 1852, S. 87. — [3]) Sitzungsber. d. Wien. Akad. **17**, 588, 1855. — [4]) De spatii sensu cutis, Inaug.-Diss., Leipzig 1858. — [5]) Wundts philos. Studien **12**, 409, 1896.

Fehlerquellen durch das Verwischen des Erinnerungsbildes eingeführt werden können.

Endlich mag hervorgehoben werden, daß durch die Methoden I und III nur das relative Lokalisationsvermögen geprüft wird, also das Vermögen, zwei Berührungsempfindungen miteinander zu vergleichen und im Verhältnis zueinander zu lokalisieren. Aber wenn auch zwei Empfindungen in dieser Weise richtig lokalisiert werden, kann doch noch ein gemeinsamer systematischer Fehler das Resultat trüben, ähnlich wie es z. B. der Fall ist, wenn zwei durch ein Prisma gesehene Punkte zwar richtig im Verhältnis zueinander gesehen werden, aber doch an unrichtigem Ort lokalisiert werden. Die Methode II gibt dagegen das absolute Lokalisationsvermögen, wenn man nur den ersten Versuch, den Punkt zu treffen, berücksichtigt. Als eine Modifikation dieser letzteren Methode kann diejenige von Henri[1]) und Pillsbury[2]) angesehen werden. Nach dieser Methode hat die Versuchsperson die Aufgabe, den berührten Punkt nicht auf dem betreffenden Körperteil, sondern auf einer Photographie oder einem Gipsmodell desselben zu zeigen.

Ein Apparat, der erlaubt, die Haut mit zwei Spitzen gleichzeitig zu berühren, wird Ästhesiometer genannt. Am einfachsten ist es, einen gewöhnlichen Zirkel oder einen Stangenzirkel anzuwenden, dessen Spitzen abgestumpft sind und aus einer schlecht wärmeleitenden Substanz verfertigt sind (um Temperaturempfindungen auszuschließen). Zweckmäßig ist es auch (nach Vierordt[3]), einen Satz Brettchen anzuwenden, auf denen je zwei Nadeln so befestigt sind, daß ihre (mäßig stumpfen) Spitzen einen unabänderlichen Abstand haben. Man hat etwa 30 solcher Nadelpaare nötig von etwa 0,3 bis zu 80 mm Spitzenabstand. Für besondere Zwecke sind kompliziertere Apparate angegeben (Griesbach[4]), Binet[5]), Bolton[6]), v. Frey[7]). Bolton verwandte in seinem Ästhesiometer zwei kleine Metallstäbchen mit Elfenbeinspitzen, die beim Aufsetzen frei in Löchern der Zirkelarme spielten, so daß sie nur mit ihrem Eigengewicht, im ganzen 5 gm, auf die Haut drückten. Hierdurch wurde ein immer gleichartiger Druck erreicht. v. Frey hat eine Einrichtung zur simultanen Reizgebung beschrieben, welche besonders für Reizung der Druckpunkte geeignet ist. Für die Methode III hat Judd[8]) einen zweckmäßigen Apparat angegeben.

Was die Resultate betrifft, zu denen man bei diesen Untersuchungen gekommen ist, so mag von vornherein die wichtige Tatsache hervorgehoben werden, daß ein sehr großer Unterschied einerseits zwischen den Simultanschwellen, insbesondere der Schwelle der erkennbaren Duplizität, anderseits der Successivschwellen, besonders der Successivschwelle für die einfache Unterscheidung von Orten auf der Haut besteht. Während diese letztere Schwelle von der Distanz zweier Druckpunkte repräsentiert wird (v. Frey, 1898), ist die Schwelle der erkennbaren Duplizität mehrmals — bis hundertmal — größer und kann auf gewissen Körperteilen 50 mm und mehr betragen (Weber, 1829). Bezüglich der anderen hier nicht besonders

[1]) Arch. de Physiol. 1893, p. 619 ff. — [2]) Amer. Journ. of Psych. **7**, 1. Abteil., 42 ff. — [3]) Siehe Kottenkamp u. Ullrich, Zeitschr. f. Biol. **6**, 38, 1870. — [4]) Pflügers Arch. **68**, 65. — [5]) Année psychol. **7**, 231, 1901. — [6]) Kraepelins psychol. Arb. **4**, 147. — [7]) Siehe Brückner, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **26**, 33, 1901. — [8]) Wundts philos. Studien **12**, 416, 1896.

berücksichtigten Simultan- und Successivschwellen finden sich ebenfalls ähnliche Unterschiede, indem die Simultanschwelle größer als die Successivschwelle zu sein scheint, doch ist der Unterschied nicht so ausgeprägt, ja die Werte können sogar zusammenfallen oder ein umgekehrtes Verhältnis zeigen; jedoch scheint es, daß die bezüglichen Arbeiten nach ihrer Anlage keine reinen Versuchsergebnisse zeitigen konnten.

Da die Fragestellung auf dem Gebiete unseres Lokalisationsvermögens noch immer ihr Gepräge von den Weberschen Untersuchungen her hat, dürfte es geeignet sein, mit diesem anzufangen.

1829 hat E. H. Weber[1]) seine bekannte Methode angegeben, um die Lokalisation der Berührungsempfindungen zu prüfen. Er beschreibt seine Methode mit folgenden Worten:

„Ich berührte bei verschiedenen Menschen, die ihre Augen verschlossen oder abwendeten, mit zwei kleinen gleichgestalteten Körpern gleichzeitig zwei Teile der Haut und fragte sie, ob sie fühlten, daß ein oder mehrere Körper sie berührten und in welcher Richtung die Linie liefe, durch die sie sich die berührten Teile der Haut verbunden denken könnten." Nach einer Beschreibung des von ihm angewendeten Zirkels, der abgeschliffene Spitzen hatte, um einen Tasteindruck, nicht eine Schmerzempfindung hervorzurufen, fährt er fort: „Indem ich nun den Zirkel anfangs mehr, dann aber immer weniger öffnete, gelangte ich zu derjenigen Entfernung der Enden der Schenkel desselben, wo die zwei Eindrücke anfingen als ein einziger Eindruck empfunden zu werden. Auch dann konnte der Beobachter noch bestimmen, ob die Linie, die die Enden des Zirkels verbindet, in der Längsrichtung seines Körpers und seiner Glieder oder in querer Richtung läge. Denn er empfand zwar nur einen Eindruck, aber der berührte Teil der Haut schien eine längliche Gestalt zu haben, und er konnte sagen, wohin der größere und der kleinere Durchmesser dieses länglichen berührten Teiles der Haut gerichtet wäre. Wurde nun aufgeschrieben, bei welcher Entfernung der Enden des Zirkels noch zwei Berührungen unterschieden wurden, oder wenigstens die Richtung der Schenkel des Zirkels noch bestimmt werden konnte . . ., und die Arbeit allmählich über die verschiedenen Teile der Haut fortgesetzt, so erhielt ich eine Übersicht über die Feinheit des Tastsinns, insofern er sich als Ortssinn äußert."

Folgende Zusammenstellung enthält die von Weber ermittelten Werte. Die Werte unter *A* geben in Millimetern (abgerundet) die Entfernung der Zirkelspitzen an, die erforderlich ist, um zwei Berührungen zu fühlen, oder — was in den meisten späteren Reproduktionen der Weberschen Zahlen vergessen ist — um aussagen zu können, ob die Hautempfindung als von einer Spitze oder von einem länglichen Gegenstande herrührend bezeichnet wird. Im zweiten Falle ist angegeben worden, ob der Gegenstand die Haut in Längsrichtung oder Querrichtung usw. berührte. Die Tabelle enthält also miteinander vermischt Werte der simultanen Duplizitätsschwelle und der Schwelle der erkennbaren Größe mit Richtungserkennung.

A	*B*
1	Zungenspitze
2	Volarseite des letzten Fingergliedes
4,5	Roter Lippenrand, Volarseite des zweiten Fingergliedes

[1]) Panegyrin. med. indicentis d. 13. mens. Nov. 1829; zit. nach Wagners Handwb. **3**, 2. Abteil., 524.

A	B
7	Dorsalseite des dritten Fingergliedes, Nasenspitze, Volarseite des Cap. oss. metacarpi
9	Mittellinie des Zungenrückens, Zungenrand, nicht roter Teil der Lippen, Metacarpus des Daumens
11	Plantarseite des letzten Zehengliedes, Rückenseite des zweiten Fingergliedes, Backen, äußere Oberfläche des Augenlids
16	Haut über dem vorderen Teil des Jochbeins, Plantarseite des Mittelfußknochens der großen Zehe, Dorsalseite des ersten Fingergliedes
23	Haut über dem hinteren Teil des Jochbeins, Stirn, hinterer Teil der Ferse
27	Behaarter unterer Teil des Hinterhaupts
31	Rücken der Hand
33	Hals unter der Kinnlade, Scheitel
41	Kreuzbein, Haut über den Glutaeen, Unterarm, Unterschenkel, Fußrücken
45	Brustbein
54	Nackenhaut, Rückenhaut über den fünf oberen Brustwirbeln und in der Lenden- und unteren Brustgegend
68	Rückenhaut an der Mitte des Halses und des Rückens, Mitte des Oberarmes und des Oberschenkels

Wie aus dieser Tabelle ersichtlich, zeigen verschiedene Regionen große Differenzen. Die niedrigsten Werte verhielten sich zu den höchsten etwa wie 1 : 70. Das beste Lokalisationsvermögen zeigte nach dieser Methode die Zungenspitze, nächstdem die Volarseite der letzten Fingerglieder; am wenigsten ausgebildet war das Lokalisationsvermögen an der Rückenhaut. An Armen und Beinen sind die kleinsten noch unterscheidbaren Entfernungen in der Querrichtung kürzer als in der Längenrichtung.

Weber hat auch das oben als Methode I bezeichnete Verfahren angewendet und teilt darüber folgende Werte mit [1]). Die Ziffern geben in Millimetern (abgerundet) die Fehler an, welche beim Versuch, einen vorher berührten Hautpunkt zu treffen, gemacht werden.

16	Mitte der vorderen Seite des Oberschenkels
8,5	Mitte der Volarseite des Vorderarmes
6,5	Mitte des Handrückens
4,3	Mitte der Hohlhand
1	Volarseite der Fingerspitzen
6,3	Auf der Stirn
5,4	Am Kinn
1	An den Lippen

Bei einer Vergleichung zwischen dieser Tabelle und der vorigen zeigt sich, daß die Werte bei successiver Reizung kleiner als bei simultaner Reizung sind. Die Bedeutung dieses Befundes scheint indessen Weber nicht bemerkt zu haben; vielmehr war es vor allem der große Simultanwert, der ihn beschäftigte und den er zu erklären versuchte. Für diese Erklärung hat er den

[1]) Verhandl. d. sächs. Gesellsch. d. Wissensch. 1852, S. 88.

Begriff „Empfindungskreis“ aufgestellt, der für seinen Urheber ursprünglich ein anatomischer Begriff war. Jeder Empfindungskreis soll dadurch ausgezeichnet sein, daß er durch einen elementaren Nervenfaden (eine markhaltige Nervenfaser) versorgt wird. Jede Nervenfaser tritt entweder durch Schlängelung oder durch Verästelung oder in beiderlei Form mit mehreren Punkten der Oberfläche ihres Empfindungskreises in Berührung. Jeder dieser Empfindungskreise soll einen besonderen Ortswert besitzen, aber eine Unterscheidung innerhalb seiner Fläche nicht mehr gestatten, in diesem letzten Umstande liegt die erklärende Bedeutung dieser Annahme von Empfindungskreisen.

Durch diese Annahme wird erklärt, daß zwei auf die Haut gesetzte Spitzen unter Umständen nur eine einzige Berührungsempfindung auslösen. Wenn die zwei Spitzen nur eine und dieselbe Nervenfaser reizen, können sie gar keinen anderen Effekt verursachen, als wie er durch eine einzige Spitze hervorgerufen wird. Und wenn die zwei Spitzen zwei Nervenfasern reizen, deren Endausbreitungen einander berühren, ist ja auch derselbe Effekt mit einer einzigen Spitze zu erreichen, und so ist der Eindruck einer einzigen Spitze anstatt zweier auch in diesem Versuch leicht erklärlich.

Wenn dagegen eine Empfindung einer einzigen Spitze entsteht, obgleich zwischen den zwei gereizten Empfindungskreisen ein dritter Kreis ungereizt bleibt, liegt zwar darin kein Beweis gegen die Annahme solcher Empfindungskreise, aber anderseits kann aus dieser Annahme die Empfindung nur einer berührenden Spitze nicht erklärt werden.

Diese Annahme anatomischer Empfindungskreise, also Hautgebiete, die nur durch eine einzige Nervenfaser innerviert werden, hat demnach eine sehr begrenzte theoretische Bedeutung und erklärt nicht jede Zusammenschmelzung der durch zwei Spitzen gesetzten Reize zu einer einheitlichen Empfindung. In der Tat fand man schon früh, daß häufig eine Empfindung nur einer einzigen Spitze entstand, obgleich zwischen den berührten Punkten mindestens ein, möglicherweise mehrere ungereizte Empfindungskreise angenommen werden mußten; mit anderen Worten, daß häufig viele zwischenliegende ungereizte Empfindungskreise nötig waren, damit zwei berührende Spitzen auch zwei getrennte Empfindungen erzeugten. Dafür konnte schon früh angeführt werden, daß der simultane Schwellenwert durch Übung sehr vermindert werden kann (Volkmann[1]) — was indessen durch spätere Untersuchungen (siehe unten) fraglich geworden ist — aber vor allem, daß der Schwellenwert bei successiver Reizung bedeutend niedriger als bei simultaner Reizung erhalten wurde. Diese Tatsache wurde auch schon durch von Weber mitgeteilte Beobachtungen sichergestellt, wenn auch Weber ihre Bedeutung nicht bemerkte; besonderes Gewicht legten erst Lotze, Goltz[2]) und Czermak[3]) auf diese Erscheinung, und der letztgenannte Forscher suchte die wirkliche Größe der anatomischen Empfindungskreise zielbewußt durch eine Bestimmung der Schwellenwerte bei Successivreizung zu bestimmen. Seine Untersuchungen können zwar nicht den Anspruch erheben, die wirkliche Größe der Empfindungskreise bestimmt zu haben, aber sie erlaubten doch, einen

[1]) Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. 1858. — [2]) De spatii sensu cutis. Inaug.-Diss., Leipzig 1858. — [3]) Sitzungsber. d. Wien. Akad. 1855, S. 474; siehe auch Judd, Wundts philos. Studien **12** (1896), wo mehrere geschichtliche Notizen zu finden sind.

oberen Wert aufzustellen und diesen Wert mit der kleinsten wahrnehmbaren Spitzendistanz bei Simultanreizung zu vergleichen. Das Ergebnis war, daß diese letzterwähnte Distanz auf gewissen Hautstellen mindestens zwei oder dreifach größer als der obere Wert der Empfindungskreise sein muß.

Aus alle dem geht hervor, daß die Erklärung Webers, welche die isolierte periphere Endausbreitung jeder einzelnen Nervenfaser voraussetzt, die Erscheinung nicht erschöpfend zu begründen vermag, daß zwei Spitzen einfach empfunden werden. Dasselbe läßt sich auch von der Theorie Czermaks behaupten. Auch Czermak nahm an, daß jede Nervenfaser sich isoliert verzweigt, aber die Ausläufer der „elementaren Nervenfäden" sollen sich nach ihm untereinander verschlingen, etwa wie die Baumwurzeln im Walde, so daß jedes Flächenstück Wurzeln vieler Bäume, bzw. Ausläufer vieler Nervenfäden erhält. Dem einzelnen Nervenfaden wird auch hier ein einheitlicher Raumwert zugesprochen, sein Ausbreitungsgebiet repräsentiert also einen Empfindungskreis. Diese Kreise liegen aber nicht neben-, sondern übereinander und decken sich zum größten Teil.

Zwar können durch diese Annahme Czermaks mehrere Phänomene besser als durch die Webersche Theorie erklärt werden, aber die Hauptsache — die große Differenz zwischen simultanen und successiven Schwellenwerten — läßt auch sie rätselhaft.

Während der wissenschaftlichen Diskussion über diese Fragen ist der Begriff „Empfindungskreis" von verschiedenen Forschern in wechselnden Bedeutungen angewendet. Wie oben erwähnt, war er für Weber ein anatomischer Begriff: die periphere Endausbreitung einer elementaren Nervenfaser, und repräsentierte also eine ganz unbekannte Größe. Da indessen seine Aufgabe darin bestand, gewisse physiologische Verhältnisse zu erklären, ist der Begriff „Empfindungskreis" bald ein mehr physiologischer geworden. Er wurde, wenn auch nicht ausgesprochen, so doch stillschweigend schon von Weber und nachher von vielen Forschern häufig mit der Hautfläche identifiziert, innerhalb deren zwei berührte diametral gelegene Punkte bei simultaner Berührung eine Empfindung von nur einer berührenden Spitze hervorrufen. Ein Empfindungskreis, in dieser Weise bestimmt, hat nichts Hypothetisches in sich, sondern ist Ausdruck für ein physiologisches Faktum und ist nach Form und Größe experimentell bestimmbar. Sein Diameter wird ja annähernd von dem simultanen Schwellenwert repräsentiert, und seine Form ist auf solchen Hautstellen, wo der Schwellenwert in verschiedenen Richtungen gleich groß ist, rund; dagegen oval, wenn — z. B. auf den Extremitäten — der Schwellenwert in Längsrichtung größer als in Querrichtung ist.

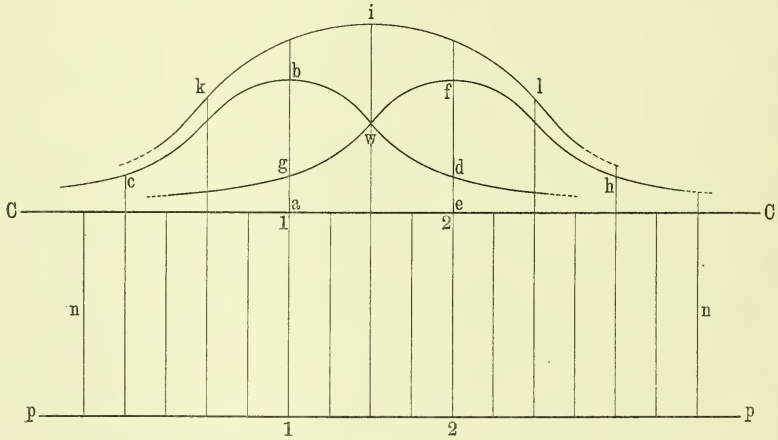
Die Größe und Form der anatomischen Empfindungskreise war dagegen durch die simultane Schwelle nicht zu bestimmen. Weber[1]) läßt auch die Frage ihrer absoluten Größe unbeantwortet, erwähnt nur beiläufig, daß sie vielleicht sehr klein, „daß man sie so klein denken kann, wie man will", im Verhältnis zur Größe der Schwellendistanz. Dagegen glaubte Weber etwas über die relative Größe und Gestalt der anatomischen Empfindungskreise aussagen zu können. Je kleiner der simultane Schwellenwert, desto kleiner

[1]) Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. 1852, S. 104 u. 117.

sind nach ihm die anatomischen Empfindungskreise, und wenn der Schwellenwert in einer Richtung größer als in einer anderen ist, ist dies dadurch bedingt, daß die Empfindungskreise länglich sind und den größeren Durchmesser stets nach derselben Richtung kehren. Weber hat dabei nicht die Möglichkeit berücksichtigt, daß vielleicht auf verschiedenen Körperteilen und in verschiedenen Richtungen mehrere ungereizte zwischenliegende Empfindungskreise nötig sind, um zwei Spitzen besonders zu empfinden. Überhaupt war es unmöglich, aus den simultanen Schwellenwerten irgendwelche Schlüsse bezüglich der Größe und der Form der anatomischen Empfindungskreise zu ziehen, nachdem bewiesen war, daß es für die getrennte Auffassung zweier Spitzen nicht hinreichend war, daß nur ein einziger Empfindungskreis zwischen ihnen eingeschaltet lag.

Da also die von Weber und Czermak und anderen vertretene Annahme fester anatomischer Empfindungskreise die auffallende Größe des simultanen Schwellenwertes nicht erklären konnte, lag es nahe, diese Tat-

Fig. 120.



sache als ein Irradiationsphänomen zu interpretieren. Ein beachtenswerter Versuch in dieser Richtung rührt von Bernstein [1]) her, der die Hypothese einer in den empfindenden Zentren stattfindenden Irradiation aufstellte. Als anatomische Voraussetzungen einer solchen Irradiation postuliert er Verbindungen der zentralen Elemente, die unsere Druckempfindungen auslösen, und ferner wäre anzunehmen, daß diese Elemente in einer solchen Fläche angeordnet sind, daß sie als geometrisches Abbild der empfindenden Hautfläche betrachtet werden kann, und daß demnach benachbarte Punkte der einen auch benachbarten Punkten der anderen entsprechen. Die Details seiner Hypothese sind aus der beigegebenen Abbildung zu entnehmen. Es sei (Fig. 120) durch die Linie *p p* die periphere Fläche, durch die Linie *C C* die zentrale Fläche dargestellt, in welcher sich die zentralen Endstationen der Nervenfasern *n n* befinden; nun möge durch die Faser 1 eine Erregung dem zentralen Elemente 1 zugeleitet sein. Die Fläche der Erregung sei durch

[1]) Untersuchungen über den Erregungsprozeß im Muskel- und Nervensystem. Heidelberg 1870. Lehrbuch d. Physiol. 1894, S. 568.

die Ordinate ab ausgedrückt, und die Kurve bcd gebe an, daß sich die Erregung in der zentralen Fläche mit abnehmender Stärke ausbreitet. Man darf nun nach den Erscheinungen der Irradiation und nach anderen Erfahrungen aus der Physiologie der Zentren die Annahme hinzufügen, daß sich der Ausbreitung der Erregung durch die zentralen Elemente ein Widerstand entgegenstellt, welcher die Erregung allmählich vernichtet. Es wird daher die Erregung sich in der zentralen Fläche nur über einen gewissen Bezirk ausbreiten können, dessen Größe von dem Widerstande der zentralen Elemente und von ihrer Dichtigkeit in der Flächeneinheit abhängig sein wird. Nimmt man an, daß der Widerstand der Stärke der Erregung proportional sei, so nimmt die Kurve bcd die gezeichnete Gestalt an. Die Grenze des Irradiationskreises würde dort liegen, wo die Erregung den Schwellenwert erreicht. Dem zentralen Irradiationskreis entspricht demnach ein peripherer Irradiationskreis, der sich über ebensoviele Endbezirke der Fasern erstreckt, als der erstere zentrale Elemente umfaßt. Denken wir uns ferner einen zweiten Reiz vom Punkte 2 der Peripherie dem zentralen Elemente 2 zugeführt, in solcher Nähe des Punktes 1, daß die beiden Irradiationskreise in weiter Ausdehnung übereinanderfallen, so werden die beiden Kurven der Erregung bcd und fgh sich zu einer gemeinsamen Kurve ikl addieren. Rücken aber die Punkte 1 und 2 weiter auseinander, so würden an dem Gipfel dieser Kurve zwei Maxima auftreten, die immer weiter auseinanderrücken, je weiter sich die Punkte 1 und 2 voneinander entfernen. Solange nun die beiden Irradiationskreise nur ein gemeinsames Maximum der Erregung zwischen sich erzeugen, kann eine Trennung der gereizten Punkte in der Wahrnehmung nicht stattfinden. Die Möglichkeit einer solchen Trennung ist erst gegeben, wenn die Punkte so weit voneinander abstehen, daß sich ein doppeltes Maximum bildet. Diese Entfernung ist dann der Durchmesser eines Empfindungskreises. Man sieht ein, daß alsdann entsprechend der Auffassung Czermaks und anderer zwischen den gereizten Punkten eine gewisse Anzahl von Endbezirken der Nervenfasern liegen müssen.

Wie aus dem oben Mitgeteilten hervorgeht, war schon früh eine Differenz zwischen der simultanen und der successiven Schwelle beobachtet worden. Wie groß diese Differenz wirklich war, ist aber erst spät festgestellt worden, und zwar vor allem durch die Untersuchungen von Judd[1]) und in endgültiger Form von v. Frey. Es ist das Verdienst v. Freys und seiner Mitarbeiter (Brückner, Metzner[2]), daß sie in systematischer Weise das Verhalten der Schwellenwerte bei isolierter Reizung der Druckendapparate untersucht haben.

Das wichtigste Ergebnis ist, daß jedes Nervenende und jeder Druckpunkt von jedem anderen unterschieden werden kann, wenigstens an den Orten, wo sie nicht so dicht stehen, daß ihre isolierte Erregung technisch undurchführbar ist. Die Bedingungen dafür sind folgende: 1. Beschränkung der Reize auf die zwei Druckpunkte, die zur Untersuchung gewählt sind. 2. Nicht zu geringe und für beide Orte möglichst gleiche Stärke der Reizung.

[1]) Wundts philos. Stud. **12** (1896). — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorg. **26**, 33, 1901; **29**, 164, 1902.

Diesen beiden ersten Bedingungen wird am besten genügt, wenn man sehr kleinflächige (stigmatische) Reize auf die vorher genau bezeichneten Orte der Nervenenden wirken läßt. 3. Reizung der beiden Orte nacheinander, nicht gleichzeitig. In bezug auf das Intervall der beiden Reize haben sich zwischen $^1/_6$ und $^3/_4$ Sek. keine auffälligen Unterschiede ergeben. Dagegen werden bei Intervallen von $^1/_9$ bzw. 2 Sek. die Resultate merklich schlechter und die Beurteilung schwieriger.

Reizt man in der angegebenen Weise zwei benachbarte Druckpunkte, so hat man den Eindruck, als ob der Reiz sich auf der Haut verschöbe. In welcher Richtung dies geschieht, ist aber sofort mit Sicherheit erst dann möglich anzugeben, wenn die Entfernung der beiden Reize um das Mehrfache größer ist als der Abstand benachbarter Druckpunkte. Sollen endlich die beiden Reize bei gleichzeitiger Einwirkung unterschieden werden, so muß ihre Entfernung noch weiter um ein Erhebliches wachsen.

Durch v. Frey ist also gezeigt, daß sogar jeder Druckpunkt eindeutig bestimmt ist. v. Frey sieht sich daher zu der Annahme genötigt, daß entweder jeder Endapparat durch einen besonderen Nervenfaden mit dem Gehirn verbunden ist oder daß Teilungen vorkommen und daß die Zweige der Nervenfäden sich zur Versorgung der Endapparate derart kombinieren, daß jeder Endapparat von jedem anderen verschieden innerviert ist.

Nach dieser Entdeckung kann man sagen, daß die Frage der anatomischen Empfindungskreise beantwortet ist; zwar nicht so, daß es jetzt bestimmt ist, ob die Enden einer elementaren Nervenfaser, wie Weber glaubte, ein kleines Hautgebiet allein versorgen, oder ob — nach Czermak, die Endausbreitungen übereinander greifen — diese Frage ist noch offen —; aber so, daß das Gebiet, innerhalb dessen zwei die Haut berührende Spitzen eine und dieselbe anatomische Einheit reizen und daher nicht verschieden empfunden werden können, mit dem kleinen Bezirk identisch ist, von dem aus ein Druckpunkt einzeln zu reizen ist. Die Verschmelzung simultaner Reize wird nach v. Frey — wie vorher von Bernstein — durch eine im Zentrum stattfindende Ausbreitung oder Diffusion der Erregung verursacht. Die physiologischen Empfindungskreise sind nach ihm nur die Projektion der zentralen Erregungskreise auf die Hautoberfläche.

Daß eine Unterscheidung zweier Tastpunkte, deren zentrale Diffusionskreise sich zum großen Teile decken, doch bei successiver Reizung möglich ist, ist nach v. Frey wahrscheinlich dadurch bedingt, daß beim Abklingen des ersten Reizes der Diffusionskreis sich verkleinert, d. h. die Erregung in der Peripherie rascher erlischt als im Zentrum. Folgt nun die zweite Erregung nach, so wird sich der ihr entsprechende Diffusionskreis entweder gar nicht bis zum Zentrum des ersten erstrecken oder es nur mit der schwach erregten Peripherie berühren. Daß es unter solchen Umständen zu größeren Erregungsdifferenzen innerhalb des gemeinschaftlichen Diffusionsfeldes kommt, ist leicht ersichtlich. Die Annahme eines verschieden raschen Abklingens ungleich starker Reize ist aber eine solche, welche sich durch mancherlei Erfahrungen aus der allgemeinen Nervenphysiologie und insbesondere aus dem Gebiete des Tastsinnes stützen läßt.

Prüft man die Theorie von Bernstein und von v. Frey, so scheint die Annahme einer Irradiation der Reizung beinahe unanfechtbar zu sein. Bei dem

jetzigen Standpunkte unserer Kenntnisse ist es überhaupt schwierig, eine andere Erklärung zu geben. Auch die Annahme, daß die Irradiation im zentralen Nervensystem stattfindet, ist sehr wahrscheinlich. Doch ist die Möglichkeit einer peripheren Irradiation nicht ausgeschlossen. Es ist durch die histologischen Forschungen sichergestellt, daß die sensiblen Nervenfäden in der Haut ein oder mehrere Geflechte bilden. Wenn ein solches Geflecht auch einen physiologischen Zusammenhang der Nervenfäden desselben Sinnes repräsentiert und wenn von diesem Geflecht die Nervenfäden zu den Endorganen gehen, kann man auch hierin eine Erklärung sehen. Dadurch, daß die von jedem Endorgan kommende Erregung sich in ganz bestimmter Weise auf die von dem Geflecht zum Zentrum gehenden Nervenfasern verteilen muß, ist eine eindeutige Bestimmung jedes Endorgans erreicht; dadurch, daß in dem Geflecht die Erregung irradiiert, wird die Zusammenschmelzung zweier Erregungen erklärt. Diese übrigens nicht sehr wahrscheinliche Möglichkeit wäre übrigens leicht zu prüfen durch eine Untersuchung darüber, ob zwei auf den beiden Rändern einer scharf geschnittenen Wunde liegende Punkte bei gleichzeitiger Reizung unterschieden werden. In diesem Falle wäre ja die eventuelle periphere Verbindung weggefallen. Die wahrscheinlichste Annahme bleibt bis auf weiteres, daß eine zentrale Irradiation stattfindet. Einer Nachprüfung scheint die viel zitierte Angabe Goldscheiders[1]) zu bedürfen, daß zwei benachbarte Druckpunkte bei simultaner Reizung unter Umständen eine Doppelempfindung geben. Diese Angabe steht mit allen übrigen Erfahrungen der Sinnesphysiologie in Widerspruch, nach welchen für eine Doppelempfindung mindestens ein unerregtes Element zwischen den gereizten Elementen liegen muß; sie steht aber auch im Gegensatz zu v. Freys mit sicheren Methoden gemachten Beobachtungen. Übrigens ist es sehr fraglich, ob nicht Goldscheider, der spitze Nadeln verwendete, mit Stechempfindungen, also von den Schmerznerven vermittelten Empfindungen, und nicht mit Druckempfindungen zu tun hatte.

Die Abhängigkeit der Simultanschwellen von verschiedenen Faktoren. Der von Weber gefundene große Unterschied zwischen den kleinsten auffaßbaren Spitzendistanzen an verschiedenen Orten muß nach der hier entwickelten Theorie von einem Unterschied in der Größe der Irradiation der Erregungen in dem Gehirn verursacht werden. Wodurch dieser Unterschied bedingt ist, ist nicht bekannt. Ein Versuch, die Tatsachen unter einem gemeinsamen Gesichtspunkte zusammenzufassen, ist von Vierordt[2]) gemacht worden. Nach ihm hängt die Feinheit des Lokalisationsvermögens — durch die kleinste wahrnehmbare Spitzendistanz gemessen — in den einzelnen Körperteilen von ihrer in hohem Grade verschiedenen Beweglichkeit ab, also auch in den einzelnen Hautbezirken desselben Körperteils von der verschiedenen Bewegungsgröße (Exkursionsweite) der Hautstellen. Deshalb ist das Lokalisationsvermögen stärker ausgebildet 1. in den Körperteilen, welche die ausgiebigsten Bewegungen vollführen, sowie in einem einzelnen Körperteil in dessen peripheren Bezirken und 2. in den Körperteilen, die besonders häufig und schnell bewegt werden. Wie Vierordt und seine Mitarbeiter[3]) (Kottenkamp und Ullrich, Paulus, Riecker und Hartmann) durch sehr ausgedehnte Untersuchungen gezeigt haben, fügen sich die Resultate dieser Regel im allgemeinen ganz gut ein. Ob indessen die verschiedene Beweglichkeit als die bestimmende Ursache der Verschiedenheiten der simultanen Schwellenwerte angesehen werden kann, ist doch nicht ganz entschieden. In solchem Falle sollte die durch die größere Beweglichkeit verursachte größere In-

[1]) Ges. Abh. **1**, 194. — [2]) Pflügers Arch. **2**, 297, 1869. — [3]) Zeitschr. f. Biol. **6**, 53 u. 73, 1870; **7**, 237, 1871; **9**, 95, 1873; **10**, 177, 1874; **11**, 79, 1875.

anspruchnahme einer gewissen Hautstelle zum Tasten eine Verminderung der zentralen Irradiationskreise verursachen [1]).

Im vorigen wurde das Lokalisationsvermögen — durch Messung der Simultanschwelle untersucht — als eine für jede Stelle bestimmte Größe angesehen. Diese ist aber tatsächlich dem Einfluß mehrerer Umstände unterworfen. Es sei gleich zuerst hervorgehoben, daß hier vieles auf die Methodik ankommt, hauptsächlich auf die Stärke und Gleichheit der Reize, wie in der letzten Zeit v. Frey scharf hervorgehoben hat. Dieser Umstand ist wichtig, weil die Möglichkeit nicht ausgeschlossen ist, daß mehrere Untersuchungen über Einflüsse auf die Simultanschwelle anders ausgefallen wären, wenn die angewendeten Methoden besser und mit größerer Kritik durchgearbeitet worden wären. Zu berücksichtigen ist auch, daß die meisten Werte der eben wahrnehmbaren Spitzendistanz als Mittelwerte zwischen weit verschiedenen Extremen zu deuten sind.

Von Czermak [2]) ist angegeben und von anderen bestätigt, daß das Alter einen Einfluß auf die Resultate ausübt, und zwar in der Richtung, daß die wahrnehmbare Spitzendistanz bei Kindern viel kleiner als bei Erwachsenen ist. Eine Ursache dürfte darin liegen, daß die Nervenenden der Haut bei Kindern dichter liegen als bei Erwachsenen. Die Abnahme des Lokalisationsvermögens ist doch durch das Wachstum nicht vollständig erklärt. Setzt man voraus, daß die Abnahme der Feinheit des Lokalisationsvermögens genau proportional sei der Zunahme der Hautausdehnung, so müßten die Kinder zum Teil in riesige Dimensionen auswachsen, um die gewöhnlichen Feinheitsgrade Erwachsener zu bekommen. Eine Vermehrung der Anzahl der Primitivfibrillen scheint während des Wachstums nicht mehr stattzufinden [3]), dazu nimmt Czermak als einen anderen Erklärungsgrund die dünnere und zartere Beschaffenheit der die Nervenausbreitungen deckenden unempfindlichen Schichten bei den Kindern; auch zentrale Vorgänge scheinen eine Rolle zu spielen. Da das Längenwachstum die Zunahme in den anderen Durchmessern an mehreren Teilen des Körpers, z. B. an den Extremitäten, überwiegt, kann dies vielleicht zur Erklärung der größeren Simultanschwelle in Längsrichtung als in Querrichtung herangezogen werden. Der Einfluß der Dehnung tritt auch hervor bei Dehnung der Bauchhaut der Schwangeren oder bei Streckung eines beweglichen Körperteiles, wie des Halses.

Von Volkmann [4]) ist zuerst angegeben, daß die Simultanschwelle durch Übung sehr vermindert wird. Dies wurde von späteren Forschern in der Hauptsache bestätigt (Krohn [5]), Solomons [6]), Washburn [7]), Tawney [8]), Funcke [9]), Dreßler [10]), Judd [11]). Sehr bemerkenswert ist es jedoch, daß in den langen Untersuchungsreihen, welche die Schüler von Vierordt, sowie Camerer ausgeführt haben, die Übung keine hervorragende Rolle gespielt hat. Und die Untersuchungen von Tawney scheinen gezeigt zu haben, daß die Verkleinerung der Schwelle bei Übung nur scheinbar ist und dabei die Suggestion der Versuchspersonen ausschlaggebend ist. Wenn die Suggestion durch das Ausbleiben der Vexierfehler als nicht mitspielend erwiesen ist, bekommt man auch keine Verminderung der Schwelle. In Übereinstimmung hiermit gibt auch Tawney an, daß

---

[1]) Eine ausführliche Darstellung der von Vierordt und seinen Mitarbeitern gefundenen Werte enthält Vierordts Grundriß der Physiologie. Fünfte Auflage. Tübingen 1877. — [2]) Wiener Sitzungsber. **15**, 466, 487, 1855 und Moleschotts Untersuch. **1**, 202. — [3]) Harting, Recherches micrométriques, Utrecht 1854. — [4]) Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Abteil. **10**, 38, 1858. — [5]) Journ. of Nerv. and Ment. diseases **7**, 219, 1893. — [6]) Psychol. Rev. **4** (1897). — [7]) Über den Einfluß von Gesichtsassoziationen auf die Raumwahrnehmungen der Haut, Leipzig, Engelmann, 1895. — [8]) Wundts philos. Stud. **13** (1898). — [9]) Hermanns Handb. **3** (2), 381. — [10]) Amer. Journ. of Psychol. **6**, 324, 1894. — [11]) Wundts philos. Stud. **11**, 409, 1895.

die durch Übung erhaltene scheinbare Verkleinerung der Raumschwelle nicht auf die eingeübte und die ihr symmetrische Hautstelle beschränkt ist, wie von Volkmann und Dreßler angegeben war.

Als ein Beweis für den Einfluß der Übung ist die Tatsache geltend gemacht worden, daß Blinde mit der tastenden Fingerspitze Details viel besser als Sehende unterscheiden können, daß sie z. B. das Gepräge einer Münze zu erkennen imstande sind, ferner die Tatsache, daß auch bei Sehenden, welche ihr Beruf zu einer regelmäßigen Anwendung der Tastorgane nötigt, das Unterscheidungsvermögen sehr verfeinert ist, so daß z. B. geübte Schriftsetzer mit Leichtigkeit die Buchstabenform der Lettern mit den Fingerspitzen erkennen. (Czermak[1]), Goltz[2]), Gärtner[3]), Heller[4]), Washburn). Es wird aber von Heller bemerkt, daß der Unterschied zwischen Sehenden und den Blinden in dieser Beziehung entschieden nicht so groß ist, wie früher angenommen wurde, und Uhthoff[5]) konnte gar keine feinere Schwelle bei den Blinden als bei den Sehenden finden. Griesbach[6]) behauptet sogar, daß, wenn auch kein erheblicher Unterschied zwischen Blinden und Sehenden in dem Unterscheidungsvermögen für taktile Eindrücke besteht, so doch kleine Differenzen zugunsten der Sehenden sprächen. Da die Ergebnisse verschiedener Forscher so außerordentlich differieren, muß die Sache als unentschieden angesehen werden. Als ein Beweis für die Verminderung der simultanen Raumschwelle durch Übung können die Verhältnisse bei Blinden jedenfalls nicht angesehen werden. Manche Verhältnisse, welche eine größere Feinheit des Tastvermögens der Blinden anzudeuten scheinen, z. B. die Geschwindigkeit, mit der ein Geübter die Braillesche Punktschrift liest, können aus ihrer großen Übung, die Eindrücke zu deuten, und aus den an die Eindrücke fest geknüpften Assoziationen hergeleitet werden und brauchen nicht als ein Beweis für eine niedrigere Raumschwelle angesehen werden.

Daß sowohl die spezielle Ermüdung des Tastorgans wie allgemeine körperliche oder geistige Ermüdung auf die Werte, welche das Lokalisationsvermögen gibt, Einfluß ausüben müssen derart, daß allmählich schlechtere Werte erhalten werden, kann wohl als selbstverständlich angesehen werden. Doch liegen noch nicht ausreichende Untersuchungen vor. Zwar teilt schon Wundt[7]) ziemlich ausführliche Angaben über Messungsergebnisse mit, welche er bei öfter wiederholter Reizung derselben Hautstelle mit gleich weit entfernten Zirkelspitzen erzielte; er fand, daß die zuerst wahrgenommene Distanz zwischen zwei Punkten sich bei Ermüdung verringert, ja vielleicht verschwindet. Und Griesbach[8]) hat eine große Anzahl von Versuchen an Gymnasiasten und anderen Personen über den Einfluß der geistigen Ermüdung angestellt und fand eine starke Herabsetzung der Empfindlichkeit schon nach einer Stunde geistiger Anstrengung, die sich nach einer Ruhepause wieder verringerte. Griesbachs Untersuchungen schienen sogar in der kleinsten wahrnehmbaren Spitzendistanz einen Maßstab der psychischen Ermüdung gegeben zu haben. Gegen Griesbachs Untersuchungen hat indessen Bolton[9]) schwerwiegende Einwände gemacht, sowohl bezüglich der Methode wie der Resultate. Er hat nicht die geringste zahlenmäßige Beziehung zwischen der Größe der Raumschwelle und dem Grade der geistigen Ermüdung feststellen können. Es zeigte sich, daß die Bestimmung einer einigermaßen zuverlässigen Raumschwelle eine so große Anzahl von planmäßig angeordneten Einzelversuchen erforderte, daß sie in einer Sitzung wegen der bald auftretenden Ermüdungserscheinungen ganz unmöglich war. Erst wenn viele Tage hintereinander unter sorgfältigster Vermeidung der zahlreichen konstanten und variabeln Fehler gearbeitet wird, konnte eine Feststellung der Wirkung bestimmter Einflüsse auf die Raumschwelle wahrscheinlich

---

[1]) Sitzungsber. d. Wien. Akad. **17**, 563, 1855. — [2]) De spatii sensu cutis, p. 9, Königsberg 1858. — [3]) Zeitschr. f. Biol. **17**, 56, 1881. — [4]) Wundts philos. Stud. **11**, 226, 1895. — [5]) Untersuchungen über das Sehenlernen eines siebenjährigen blindgeborenen und mit Erfolg operierten Knaben, S. 54, Hamburg u. Leipzig 1891. — [6]) Pflügers Arch. **74**, 577, 1899 u. **75**, 365, 1899. — [7]) Beitr. z. Theorie d. Sinneswahrnehmung 1862, S. 37. — [8]) Arch. f. Hygiene **24** (1895). — [9]) Kräpelins psychol. Arbeiten **4**, 175 bis 234.

gemacht werden. Aber solche Bestimmungen liegen noch nicht vor. Überhaupt scheint es, daß man die Schwierigkeiten bei den hierher gehörigen Versuchen unterschätzt hat, und daß die Ergebnisse ohne genügende Kritik verwertet worden sind.

Obgleich ja der simultane Schwellenwert wahrscheinlich von zentralen Zuständen in erster Linie abhängig ist, ist es nicht ausgeschlossen, daß auch periphere Momente Einfluß ausüben können. Da man aber erst in letzter Zeit die Schwierigkeiten der diesbezüglichen Untersuchungen eingesehen hat, wäre es wünschenswert, daß die vorliegenden Angaben über periphere Einflüsse auf den Schwellenwert nachgeprüft würden. Mehrere solche Versuche liegen vor.

So soll nach Brown-Sequard[1]) und mehreren Forschern (Rumpf[2]), Klinkenberg[3]), Serebrenni[4]), Schmey[5]) die Hyperämie eine Verfeinerung der Unterschiedsempfindlichkeit bewirken. Nach Alsberg soll im Gegenteil eine Vergrößerung des Schwellenwertes durch Hyperämie bewirkt werden, aber seine Methode soll nach Klinkenberg unbrauchbar sein. Im Gegensatz zur Hyperämie soll die Anämie nach Angaben von Alsberg[6]), Klinkenberg[7]), Rumpf[8]) und Eulenburg[9]) von einer Herabsetzung der Empfindlichkeit begleitet sein, und in derselben Weise soll Kälte wirken. Eine Vergrößerung der Simultanschwelle soll auch angeblich die verminderte Empfindlichkeit begleiten, welche bei Druck auf die Hautnerven, z. B. beim sogenannten Eingeschlafensein der Glieder oder bei der lokalen Applikation anästhetischer oder narkotischer Mittel, wie Äther, Chloroform, Morphium, entsteht (Kremer[10]).

Wahrnehmung der Größe und der Gestalt der Objekte. Die Fähigkeit, die Berührungsempfindungen zu lokalisieren, bedingt unsere Schätzung der Größe und der Form eines die Haut berührenden Gegenstandes, sofern andere als Hautempfindungen, also besonders Gesichts- und Muskelempfindungen, ausgeschlossen sind. Um überhaupt eine solche Schätzung ausführen zu können, ist es bei simultaner Berührung erforderlich, daß die Größe des Gegenstandes die simultane Schwelle der erkennbaren Größe übertrifft. Nur wenige Zahlen liegen indessen über diese Schwelle vor. Für die Mitte der Volarseite des Vorderarmes ist sie von Judd[11]) zu 6 bis 12 mm bestimmt (mit wahrnehmbarer Richtung 28 bis 48 mm). Da diese Schwelle an verschiedenen Körperteilen verschieden sein dürfte, leuchtet es ein, daß je nach der berührten Hautstelle ein Gegenstand verschieden groß geschätzt wird. Aber auch Gegenstände, welche die Schwellenwerte der verschiedenen Hautstellen übertreffen, werden verschieden geschätzt, wie aus Camerers[12]) Untersuchungen hervorgeht. Seine Methode, die als die Methode der Äquivalenz bezeichnet wird, bestand darin, daß er auf eine bestimmte Hautstelle zwei Spitzen einwirken ließ, deren Distanz größer als die Simultanschwelle war, und nachher für eine zweite Hautstelle diejenige Distanz ermittelte, die als gleich groß aufgefaßt wurde. Das Verhältnis zwischen den so als gleich

---

[1]) Arch. de physiol. 1858, p. 344 ff. — [2]) Verh. d. zweiten med. Kongr. zu Wiesbaden 1883, S. 202 ff. — [3]) Über den Einfluß der Hautreize auf die Sensibilität der Haut. Inaug.-Diss., Bern 1876. — [4]) Der Raumsinn der Haut. Inaug.-Diss., Bonn 1883. — [5]) Du Bois-Reymonds Arch. 1884, S. 309. — [6]) A. a. O., S. 518. — [7]) A. a. O., S. 24. — [8]) A. a. O., S. 304. — [9]) Berl. klin. Wochenschr. 1865, S. 510. — [10]) Pflügers Arch. **38**, 271, 1883. — [11]) Wundts philos. Stud. **12**, 431, 1896. Vgl. auch die Werte Webers, betreffend das Vermögen, die kreisförmige Figur und den von ihr eingeschlossenen Raum einer Röhre wahrzunehmen. Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. 1852, S. 97. — [12]) Zeitschr. f. Biol. **23**, 509 ff., 1887.

aufgefaßten Längen wird Äquivalenzverhältnis genannt. Zum Beispiel: Da eine Distanz von 4 Pariser Linien[1]), an der Stirn aufgesetzt, gleich groß wie eine solche von 2,4 Linien, an der Oberlippe aufgesetzt, geschätzt wird, ist das Äquivalenzverhältnis 4/2,4 = 1,67; diese Zahl sagt also aus, daß an der Stirn ein 1,7 mal so großer Sinnesreiz notwendig war wie an der Oberlippe, um gleiche Empfindung hervorzurufen. Für zwei miteinander verglichene Hautstellen wechselt dies Verhältnis mit der Distanz der Spitzen, so daß die Äquivalenzverhältnisse mit wachsender Distanz sich mehr und mehr der Einheit nähern und bei größeren Distanzen gleich großer Strecken gleich aufgefaßt werden.

Über die Unterscheidbarkeit ungleich großer Flächen von gleicher Form liegen einige Angaben von Eisner[2]) vor, wonach zirkelrunde Flächen, wenn sie einen Durchmesser von 1 bzw. 2 mm haben, an der Fingerspitze unterschieden werden. Am Handrücken sind die entsprechenden Zahlen 2 und 6 mm, am Rücken 2 und 25 mm.

Die Fähigkeit, die Gestalt einer aufgesetzten Fläche zu erkennen, ist sehr wenig ausgeprägt, ja fast gar nicht vorhanden. Wir fühlen zwar, wenn wir nacheinander zwei anders gestaltete Flächen aufsetzen, daß die Form derselben eine verschiedene ist, aber eine nähere Bestimmung über die Form derselben zu machen, ob z. B. die eine dreieckig, die andere rund ist, ist nicht möglich. Besser scheinen Gestalten wahrgenommen zu werden, wenn die Eindrücke der verschiedenen Details successiv kommen (fortfahrend, ohne daß dabei Muskelsinnsensationen vorkommen. Man kann z. B. auf die Haut geschriebene Buchstaben, wenn sie genügend groß sind, erkennen (Weber[3]), Churchill[4]). Wahrscheinlich steht dies in Zusammenhang mit dem Unterschiede zwischen der Simultanschwelle und der Successivschwelle.

Die Lokalisation der Temperaturempfindungen. Über die Lokalisation unserer Temperaturempfindungen liegen nur wenige Angaben vor; diese Frage ist nicht in systematischer Weise, mit Berücksichtigung der verschiedenen in Betracht kommenden Schwellenwerte behandelt, und die wenigen vorliegenden Beobachtungen scheinen eine Nachprüfung zu erfordern; die Lokalisation unserer Wärme- und Kälteempfindungen wäre natürlich für sich zu behandeln.

Nach Rauber[5]) sollen die Wärmeempfindungskreise sich im allgemeinen ebenso wie die Druckempfindungskreise verhalten. Er benutzte strahlende Wärme, indem er erwärmte Metallkugeln in Bohrlöcher von Holzplatten legte und die letzteren auf die Haut setzte. Die Lokalisation der Kälteempfindungen wurde nicht untersucht, was bei der früheren Anschauung von der Einheit des Temperatursinnes nicht wundernehmen kann.

Goldscheider[6]) hat die Simultanschwelle bei Reizung isolierter Kältepunkte resp. Wärmepunkte untersucht, wobei die mechanische Reizung der Drucknerven möglichst ausgeschlossen wurde. Er fand dabei unerwartet niedrige Minimalwerte; ja, zwei benachbarte Temperaturpunkte sollen nach ihm bisweilen als doppelt

---

[1]) Eine Pariser Linie = 2,25 mm. — [2]) Beurteilung der Größe und der Gestalt von Flächen. Inaug.-Diss., Erlangen 1888. — [3]) Sitzungsber. d. sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Kl., 1852/54, S. 85. — [4]) Wundts philos. Stud. **18**, 478, 1901/03, wo eine Analyse dieser Versuche gegeben ist. — [5]) Rauber, Über den Wärmeortssinn. Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 1869, S. 372. — [6]) Ges. Abh. **1**, 179.

empfunden und dabei die zwischenliegende Distanz durchgehends zu weit geschätzt werden. (Siehe die Bemerkungen hierüber S. 723.)

Czermak[1]) und Klug[2]) haben untersucht, in welchem Abstande man die stumpfen oder ebenen Enden eines kalten und eines warmen Stäbchens auf die Haut setzen muß, damit die Verschiedenheiten ihres Ortes gerade nicht mehr wahrgenommen werden können. Man fühlt dann an einer und derselben Hautstelle Wärme und Kälte, was den Beobachter in eine eigentümliche, nicht zu beschreibende Verwirrung versetzt. Auch ein Schwanken der Wahrnehmung, ähnlich dem Wettstreite der Sehfelder, soll unter Umständen eintreten. Durch die Auslösung der Wärme- und der Kälteempfindung von derselben Hautstelle entsteht aber auch bisweilen eine Mischempfindung besonderer Art. Wenn z. B. zu einer kräftigen Wärmeempfindung eine intensive, an derselben Hautstelle lokalisierte Kälteempfindung sich addiert, hat man bisweilen den Eindruck, als ob die Temperatur plötzlich erhöht würde. Die dabei entstehende Empfindung ist derjenigen ähnlich, welche man in sehr heißem Wasser bekommt[3]).

Die Lokalisation der Schmerzempfindungen. Es ist eine alte Behauptung, daß die Schmerzempfindungen im allgemeinen sehr schlecht lokalisiert werden, und dies soll auch als für die in der Haut ausgelösten Schmerzempfindungen gültig sein. Es muß indessen hervorgehoben werden, daß diese Angabe nicht durch Versuche begründet ist und, was die stechenden Schmerzempfindungen der Haut in ihren schwächeren Intensitäten betrifft, wahrscheinlich unrichtig ist. Ein großes noch nicht hinreichend erforschtes Feld liegt hier vor. Überhaupt ist keiner von den verschiedenen Schwellenwerten des Lokalisationsvermögens, welche oben (siehe S. 713) erwähnt sind, für die Schmerzempfindungen durch systematische Messungen aufgesucht.

Mitempfindungen und verwandte Erscheinungen. Die Größe der Simultanschwelle hat, wie oben hervorgehoben ist, zu der Annahme einer Irradiation der Erregung, eines Überspringens der Erregung von der primär erregten Bahn auf andere Bahnen geführt. Durch Irradiation werden auch der diffuse Zahnschmerz bei Pulpitis nur eines Zahnes, das im Halse lokalisierte Gefühl bei Berührung des Gehörganges bewirkt. Am häufigsten findet die Irradiation nach nahe benachbarten Nervengebieten statt[4]).

Das Überspringen der Erregung kann aber auch ausnahmsweise auf entfernter gelegene Nervenbahnen bzw. Ganglienzellen erfolgen, und die Empfindung wird dann nach räumlich von der primär erregten Stelle weit entlegenen Körperteilen exzentrisch projiziert. (Entferntere Mitempfindungen.) Die auf die wirklich erregte Hautstelle lokalisierte Empfindung nennt man häufig die primäre, die andere die sekundäre. Bisweilen, jedoch sehr selten, ist auf der primär erregten Bahn die erzeugte Empfindung sehr gering oder Null, so daß die auf der sekundär erregten Bahn erzeugte Empfindung sich für das Bewußtsein vorwiegend oder allein geltend macht. (Übertragene Empfindung, paradoxe Empfindung (Quincke.)

Besonders sind es die Stichempfindungen, welche solche entferntere Mitempfindungen hervorrufen. Kowalewsky[5]) hat versucht, einige Gesetz-

---

[1]) Sitzungsber. d. Wien. Akad. 1855, S. 500. — [2]) Arb. d. physiol. Anst. zu Leipzig **11**, 168, 1876. — [3]) Thunberg, Skand. Arch. f. Physiol. **11**, 432, 1901. — [4]) Siehe die grundlegenden Ausführungen Quinckes, Zeitschr. f. klin. Med. **17** (1886). — [5]) Hoffmann-Schwalbes Jahresber. **13** (2), 26.

mäßigkeiten für diese Schmerzempfindungen aufzufinden. 1. Die Mitempfindung erscheint stets an derselben Seite des Körpers, an welcher die Reizung stattgefunden hatte. 2. Die Mitempfindungen erscheinen gewöhnlich in Regionen, die ihre Nerven von höher gelegenen Wurzeln des Rückenmarks im Vergleich zu den ursprünglich erregten erhalten. 3. Größtenteils gruppieren sich die Mitempfindungen auf der hinteren Seite des Körpers, in der Umgegend des Oberarmes und des Schulterblattes [1]).

Verwechslungen durch fehlerhafte Lokalisation. Unter ganz normalen Verhältnissen besteht nach Henri [2]) eine gewisse Neigung, bei Lokalisation einer Berührung, die einen bestimmten Finger getroffen hat, die Finger zu verwechseln. Fordert man Versuchspersonen auf, die Hand mit gestreckten, nicht unterstützten Fingern vorzuhalten und unter Ausschluß der Augenkontrolle die berührte Phalanx zu benennen (End-, Mittel- oder Grundglied), so gelingt dies fast stets ohne die geringsten Schwierigkeiten. Unter der Voraussetzung aber, daß nach erfolgter Berührung orientierende Bewegungen streng untersagt sind, besteht bei manchen Individuen im Falle der Berührung der drei mittleren Finger eine gewisse Unsicherheit über den berührten Finger, und die rasche und richtige Angabe ist zeitweilig erschwert. Dabei werden mit unverkennbarer Vorliebe Ring- und Mittelfinder miteinander verwechselt. In derselben Weise werden die drei mittleren Zehen und insbesondere die zweite oder die dritte nicht selten miteinander verwechselt, besonders von Individuen, welche in der Selbstbeobachtung nicht geübt sind. Solche Verwechslungen treten um so häufiger auf, je ungewöhnlicher die Haltung der Finger oder der Zehen ist (siehe E. Müller [3]).

Geradezu konstant [4]) ist eine solche Verwechslung bei dem bekannten Versuch des Aristoteles, der darin besteht, daß eine kleine, zwischen den gekreuzten Mittel- und Zeigefingern gehaltene Kugel als doppelt empfunden wird. Dieser Aristotelessche Versuch, in folgender von Henri angegebener Weise abgeändert, zeigt, daß bei gekreuzter Lage die Finger verwechselt werden. (Siehe die Figuren, welche der Arbeit Henris entlehnt sind.) Es seien in der normalen Lage der Finger (vgl. die Figur) die Punkte *a* und *b* berührt. Wird nun die Versuchsperson aufgefordert, auf einer Zeichnung ihrer Finger, welche dieselben in normaler Lage

Fig. 120 a.

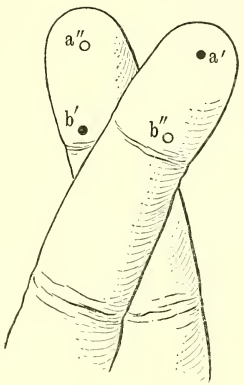
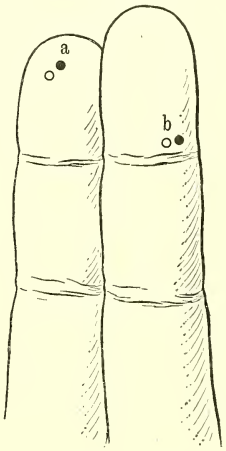


Fig. 120 b.



[1]) Siehe auch Mayer, Über eine vom Nabel ausgelöste Mitempfindung, Jahrb. f. Psychiatr. u. Neurol. **22** (1902). — [2]) V. Henri, Über die Raumwahrnehmung des Tastsinnes, Berlin 1898, S. 126. — [3]) Berl. klin. Wochenschr. 1903, S. 689. — [4]) Genaueres über dasselbe siehe Henri, S. 67.

wiedergibt, die berührten Stellen zu lokalisieren und sich dabei die Lage der Finger genau vorzustellen, daber keine Bewegung zu machen, so zeigt dieselbe auf dieser Zeichnung sehr nahe bei a und b gelegene Punkte, die in Fig. 120 b durch ○ eingetragen sind. Die Punkte a und b entsprechen nun bei gekreuzter Lage a' und b' (Fig. 120 a). Wenn man diese Punkte in der gekreuzten Lage der Finger berührt, so zeigt die Versuchsperson auf einer Zeichnung, die die Finger in gekreuzter Stellung wiedergibt, die Punkte a'' und b''. Drückt man a', so erscheint es der Versuchsperson, daß der Punkt a'' gedrückt wird, und ebenso korrespondiert b' mit b''. Diese Verwechslungen und ihre Bedingungen zeigen, daß das Vermögen, Tasteindrücke zu lokalisieren, nur die gewöhnlichen Verhältnisse beherrscht, daß es aber unter abnormen Bedingungen nicht ausreichend ist und daß bei der Lokalisation andere Empfindungsarten (Bewegungsempfindungen, Gesichtsempfindungen) von Bedeutung sind; es steht das in guter Übereinstimmung mit der genetischen Theorie der Deutung unserer Sinneseindrücke. Bezüglich der verschiedenen genetischen und nativistischen Theorien muß auf die Darstellungen Henris und der psychologischen Lehrbücher verwiesen werden.

XII. Die Subjektivierung und Objektivierung der Hautempfindungen.

Unsere Empfindungen werden häufig in zwei große Gruppen geteilt, die man die äußeren und die inneren Empfindungen nennen kann und welche sich dahin charakterisieren lassen, daß die äußeren von uns objektiviert, d. h. als Eigenschaften von äußeren Gegenständen aufgefaßt werden, die inneren dagegen nicht objektiviert, sondern als Zustände unser selbst gedeutet werden. Diese Kategorien entsprechen E. H. Webers Sinnesempfindungen und Gemeingefühlen. Da indessen diese letzteren unzweifelhaft ebenso gut Empfindungen wie die ersteren sind, scheint, wie Öhrwall[1]) bemerkt, der Ausdruck „Gemeingefühle“ ungeeignet, ebenso wie die Ausdrücke „Organempfindungen“, „Sensations systématiques“.

Eine bestimmte Empfindung muß aber nicht unter allen Umständen entweder eine innere oder eine äußere sein, sondern kann bisweilen objektiviert, bisweilen als ein Zustand unseres eigenen Körpers aufgefaßt werden. Das ist auch mit den Hautempfindungen der Fall, und eben diese Tatsache hat Weber[2]) zu einer Analyse geleitet, welche gezeigt hat, was der Objektivierung der Empfindungen zugrunde liegt. Folgendes Beispiel mag nach Weber angeführt werden. Die Temperatur unserer Haut kann auf doppelte Weise erhöht werden, durch eine vermehrte Zuführung von Wärme von innen, wenn mehr warmes Blut in die Haut strömt, und durch die vermehrte Mitteilung von Wärme von außen. In beiden Fällen fühlen wir, daß unsere Haut wärmer wird. Übt der Körper, der uns mehr Wärme von außen mitteilt, zugleich einen Druck auf unsere Haut aus, so sind wir nicht zweifelhaft, daß die Wärme von außen komme; wir fühlen dann, daß der drückende Körper warm sei. Wirkt aber die strahlende Wärme auf uns ein, so ist es viel schwerer

[1]) Skand. Arch. f. Physiol. 11, 251, 1901. — [2]) Wagners Handwörterb. 3 (2), 485.

zu entscheiden, ob die Wärme von außen oder von innen auf uns wirke. Erst durch geeignete Bewegungen ist die Entscheidung möglich. Läßt man jemand seine Augen schließen und nähert seinem Gesichte einen glühenden Eisenstab und läßt die Person dann den Kopf wiederholt nach rechts und links und in anderer Weise bewegen, so empfindet sie sehr bestimmt, daß die Wärme von außen kommt und kann die Lage der Wärmequelle bestimmen, weil bei den Kopfbewegungen die Art der Wärmeempfindung sich ändert. Wäre die Wärmequelle in unserer Haut, so würde sie sich zugleich mit unserer Haut bewegen und ihren relativen Ort beibehalten. Durch Empfindungen unserer eigenen freiwilligen Bewegungen kommen wir mittels einer Reihe unbewußter Schlüsse schon früh dahin, daß wir die Empfindungen, welche sich bei unseren Bewegungen in regelmäßiger Weise ändern, als Eigenschaften äußerer Gegenstände auffassen, andere aber, welche durch äußere Bewegungen nicht geändert werden, als Zustände unseres eigenen Körpers.

Dieselbe Ursache, welche es, wie Weber gezeigt hat, bedingt, daß eine Wärmeempfindung bisweilen eine objektivierte, bisweilen eine nicht objektivierte ist, ist auch für unsere übrigen Hautempfindungen gültig. Auch unsere Schmerzempfindungen, welche wohl als typische Gemeingefühle meistens aufgefaßt werden, werden doch bisweilen objektiviert und werden als Eigenschaften äußerer Objekte aufgefaßt. Es handelt sich um die Schmerzempfindungen, die allein oder mit anderen Empfindungen vermischt bedingen, daß wir einem Gegenstande die Eigenschaften scharf, stechend spitzig, brennend heiß zuschreiben, insoweit dies von den Hautsinnen abhängt.

Wenn die Kriterien, von welchen man sich bei der Wahl zwischen Subjektivierung und Objektivierung leiten läßt, ungenügend sind, werden häufig Irrtümer gemacht, wie aus Külpes[1]) Versuchen hervorgeht. Bekanntlich entstehen spontan, ohne äußere Reize, häufig Hautempfindungen, z. B. schwache Berührungsempfindungen. Külpe applizierte an einer Hautstelle seiner Versuchspersonen dann und wann mechanische Reize, ließ sie aber über alle Sensationen, die sie an der Versuchsstelle verspürten, berichten, insbesondere angeben, ob sie dieselben für subjektiv oder objektiv hielten, und wenn besondere Motive sie dazu veranlaßten, diese mitteilen. Es zeigte sich dabei, daß häufig die Empfindungen falsch objektiviert wurden, beinahe niemals aber subjektiviert. Die Motive der Subjektivierung und der Objektivierung waren bei den Versuchspersonen verschieden.

XIII. Die Physiologie der Hautsinne und das Gesetz der spezifischen Sinnesenergien.

Der Ausgangspunkt der Versuche, durch welche Blix die Existenz besonderer Kälte-, Wärme- und Drucknerven bewiesen hat, war das Gesetz der spezifischen Sinnesenergien von Johannes Müller, ein Gesetz, das so formuliert werden kann: Die Empfindungen, welche entstehen, wenn ein Sinnesnerv erregt wird, haben immer dieselbe Qualität, unabhängig von der Art und dem Angriffspunkt des Reizmittels. Es fragt sich, inwieweit die bisherigen Erfahrungen der Physiologie der Hautsinne sich diesem Gesetze unterordnen.

[1]) Wundts philos. Stud. **19**, 508, 1902.

Zurzeit kann man behaupten, daß, wenn auch noch einige Schwierigkeiten bestehen, die meisten Ergebnisse in guter Übereinstimmung mit diesem Gesetze stehen und zugleich die beste Stütze desselben bilden. Ein Folgesatz dieses Gesetzes ist, daß jede abgegrenzte Empfindungsqualität durch eigene Nervenendorgane vertreten sein muß. Durch die v. Freysche Entdeckung der Schmerzpunkte und die Schlüsse, zu denen sie berechtigt, ist die größte Schwierigkeit aus dem Wege geräumt worden. Doch ist es zurzeit noch nicht abgemacht, wie die von der Haut ausgelösten juckenden und kitzelnden Empfindungen aufzufassen sind, ob sie abgegrenzte Empfindungsqualitäten sind, oder ob sie nur Schmerz- bzw. Druckempfindungen sind, welche durch einen besonderen Gefühlston, durch ihre Irradiation und ihre Tendenz, Reflexe auszulösen, einen besonderen Charakter erhalten haben. Weitere Untersuchungen hierüber und über die Frage, ob die juckenden und kitzelnden Empfindungen durch besondere Nerven ausgelöst werden, sind notwendig, ehe die Gültigkeit des Gesetzes der spezifischen Sinnesenergien auch in diesem Falle als gesichert betrachtet werden kann.

Das Gesetz der spezifischen Sinnesenergien fordert, daß auch inadäquate Reize, wenn sie eine Erregung bewirken, dieselbe Empfindungsqualität auslösen, welche den betreffenden Nerven bei adäquater Reizung charakterisiert. Dagegen fordert dies Gesetz keineswegs, daß jeder Sinnesnerv oder jedes Endorgan auf alle möglichen Reizmittel reagiere[1]). Über das Verhalten der Hautnerven in dieser Richtung hat schon Blix mitgeteilt, daß elektrische Hautreizung verschiedene Sensation an verschiedenen Hautstellen hervorruft. Auf dem einen Punkte entsteht nur Schmerz-, auf einem anderen Kälteempfindung, auf einem dritten Wärmeempfindung, auf einem vierten vielleicht Druckempfindung, und Blix schließt aus diesen Beobachtungen, daß die Art der Empfindung nicht von der Art des Reizmittels, sondern von der spezifischen Energie des Nerven abhängig ist.

Reizbarkeit der Drucknerven durch inadäquate Reize hat man bisher nur bei elektrischer Reizung konstatieren können. Die Reizbarkeitsverhältnisse der Kälte- und Wärmenervenenden sind besser untersucht. Schon Goldscheider[2]) hat angegeben, daß diese Punkte durch mechanische Reize — Druck, Stoß — erregt werden können, und diese Angabe ist von mehreren Forschern (Donaldson[3]), Kiesow[4]), Alrutz[5]) bestätigt, wenn von anderen allerdings auch bestritten worden (Dessoir[6]), Nagel[7]). Auch durch chemische Reizung der Kälte- und Wärmenerven werden die entsprechenden Empfindungen ausgelöst, wie Goldscheider[8]) für Menthol und Kohlensäure gezeigt hat. Rollets[9]) Angabe, daß die durch Menthol hervorgerufenen Kälteempfindungen von den Schmerznerven ausgelöst werden, scheint nicht genügend begründet zu sein.

Von theoretischem Interesse ist die Frage, ob die Kälteendorgane anders als mit Kälteempfindungen, die Wärmeendorgane anders als mit Wärmeempfindungen antworten können. Hierüber gibt Kiesow[10]) an, daß Kälte, auf

[1]) Siehe Öhrwalls ausführliche Darstellung. Skand. Arch. f. Physiol. **11**, 260, 1901. — [2]) Ges. Abh. **1**, 118. — [3]) Mind 1885. — [4]) Wundts philos. Stud. **11**, 135, 1895. — [5]) Skand. Arch. f. Physiol. **7**, 327, 1897. — [6]) Dubois-Reymonds Arch. 1892, S. 250. — [7]) Pflügers Arch. **59**, 576, 1895. — [8]) Ges. Abh. **1**, 250 u. 305. — [9]) Pflügers Arch. **74**, 457, 1899. — [10]) Wundts philos. Stud. **11**, 135, 1895.

Wärmepunkte appliziert, niemals Kälteempfindung erzeugt, dagegen wurden von ihm von den Kältepunkten Wärmeempfindungen erhalten, was Nagel[1]) und Kelchner und Rosenblum[2]) bestätigt haben, Alrutz[3]) aber bestreitet. Wie Kiesow selbst hervorgehoben hat, erlaubt dies nicht den Schluß, daß die Kälteendorgane mit Wärmeempfindungen antworten. Wahrscheinlich ist hier eine Wärmeempfindung vorhanden, die durch Leitung der Wärme bis zu in der Nähe liegenden Wärmeendorganen entstanden zu denken ist. Dann wäre der Gegensatz zwischen den vorliegenden Angaben nur scheinbar, und man kann zurzeit behaupten, daß die Ergebnisse Alrutz', dessen Methodik es gestattete, vom Kältepunkte aus nur das unterliegende Kälteendorgan zu erregen, die oben erwähnte Deutung bestätigen. Die Frage dürfte jedoch weiterer Untersuchung wert sein.

---

[1]) Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg. **10**, 277, 1896. — [2]) Ebenda **21**, 174, 1899. — [3]) Skand. Arch. f. Physiol. **7**, 326, 1897.

Die Lage-, Bewegungs- und Widerstandsempfindungen[1])

von

W. Nagel.

Der Versuch einer lehrbuchmäßigen Darstellung der Lehre von den Lage-, Bewegungs- und Widerstandsempfindungen begegnet zurzeit noch erheblichen und eigenartigen Schwierigkeiten. Zunächst gibt es natürlich auf diesem Gebiete wie in fast allen Teilen der Physiologie noch theoretische Fragen, über deren Beantwortung die Anschauungen bewährter Forscher weit auseinandergehen. Ferner klafft hier wie anderwärts noch so manche Lücke in unserer Kenntnis der Tatsachen. Eine ganz besondere Schwierigkeit aber bietet sich in der Behandlung dieses Kapitels der Sinnesphysiologie infolge der Notwendigkeit, recht heterogene Dinge zusammen behandeln zu müssen, ohne die Möglichkeit, dieser Heterogeneität so recht Rechnung zu tragen. Die an und für sich sehr wenig glücklich gewählten Ausdrücke „statischer Sinn" und „Muskelsinn" kennzeichnen zwei Gebiete der Sinnesphysiologie, die sich begrifflich wohl scharf scheiden lassen, deren getrennte Behandlung aber wohl nur demjenigen gelingen dürfte, der sich über gewisse Unsicherheiten und Lücken unserer tatsächlichen Erfahrung leichter hinwegsetzt, als es mir zurzeit noch erlaubt und möglich erscheint. Wohl heben sich aus dem Gesamtgebiet die Widerstandsempfindungen als eigenste Domäne des sog.

[1]) Die namentlich hinsichtlich des sog. statischen Sinnes enorm angeschwollene Literatur zitiere ich hier nur insoweit, als es sich um Arbeiten handelt, deren Inhalt für die von mir vorgetragene Lehre von entscheidender Bedeutung ist, außerdem etliche der wichtigsten gegnerischen Arbeiten. Wer sich spezieller orientieren will, als dies mit Hilfe vorliegenden Werkes möglich ist, findet reichhaltige Literaturangaben an folgenden Stellen:

v. Stein, Die Lehre von den Funktionen der einzelnen Teile des Ohrlabyrinths. Jena (G. Fischer) 1894. (Eine kritische, nicht immer sonderlich glückliche Revue der Literatur bis 1894.)

Stern, Die Literatur über die nichtakustische Funktion des inneren Ohres. Arch. f. Ohrenheilk. 39, 248 bis 284, 1895. (Die Literatur ist mit großer Vollständigkeit gesammelt, geschickt zusammengestellt und für jede der 248 Arbeiten der Inhalt angedeutet.)

Literatur über die Pathologie der „Orientierung" ist neuerdings zusammengestellt von Fr. Hartmann, Die Orientierung. Leipzig (Vogel) 1902.

Reichhaltige Literaturangaben über Muskelsinn und Verwandtes finden sich bei Woodworth, Le mouvement. Paris 1903.

Muskelsinnes, die Empfindungen der Drehbeschleunigung als zweifellos dem Sinne des Labyrinths („statischer Sinn" will hier gar nicht passen) zugehörig deutlich heraus; wohin gehören aber die Empfindungen der Lage (Orientierung) des Gesamtkörpers und der Augen, wohin die Empfindung der Progressivbewegung? Trotzdem uns die letzten Jahrzehnte vorzügliche Leistungen auf diesem Gebiete der Sinnesphysiologie gebracht haben (ich denke hier vor allem an die Arbeiten Breuers), werden sich doch nur wenige getrauen, diese Fragen in Kürze zu beantworten. Der Sachkundige wird vielmehr zugestehen, daß in diesen beiden Teilgebieten unseres Sinneslebens sich das, was man in weitester Bedeutung Muskelsinn und was man statischen Sinn nennt, zusammentut zu gemeinsamer Leistung; und trotz des von verschiedenen Seiten aufgewandten Scharfsinns hat sich die Analyse der Bewegungs- und Lageempfindungen noch nicht auf den Punkt bringen lassen, wo sie uns befriedigende Klarheit über das Ineinandergreifen des Muskelsinnes und des statischen Sinnes geben könnte.

Es ist das ja nicht etwas sonst Unerhörtes; auch auf anderen Gebieten der Sinnesphysiologie begegnen wir ähnlichen Schwierigkeiten, ich erinnere nur an die nicht ganz einfachen Beziehungen zwischen Geruch und Geschmack. Aber erstens ist in diesem Falle die Möglichkeit der experimentellen Feststellung doch gegeben, ob eine bestimmte Empfindung durch Reizung der Riechnerven oder der Schmecknerven eintritt; und zweitens betrachtet man ja — mit wieviel Recht, bleibe dahingestellt — Geruch und Geschmack als zwei in sehr ähnlicher Weise arbeitende Sinne, was niemand von den zwei Sinnesgebieten behaupten wird, die im Labyrinth einerseits und in den sensibeln Nerven der Muskeln, Sehnen und Gelenke anderseits repräsentiert sind.

Unter diesen Umständen erscheint es mir angebracht, der Behandlung des hier in Frage kommenden Materials eine Gliederung zugrunde zu legen, die zwar den Stempel des Provisorischen an sich trägt, dafür aber den Vorteil bietet, Tatsachen und Hypothesen nach Möglichkeit klar auseinander zu halten und den Anschein zu vermeiden, als ob wir über das Wesen der Lageempfindungen und gewisser Bewegungsempfindungen im klaren wären, wo wir es meines Erachtens noch nicht sind.

So bespreche ich denn zuerst das über Empfindungen der Lage und Bewegung empirisch Festgestellte, und nehme erst nachträglich in den weiteren Kapiteln Stellung zu den Hypothesen, die zur Deutung dieser Erscheinung aufgestellt worden sind.

Den Widerstandsempfindungen, die, wie erwähnt, sich reinlicher gegen das übrige abgrenzen lassen, bleibt ein besonderes Kapitel vorbehalten.

I. Die Lageempfindungen.

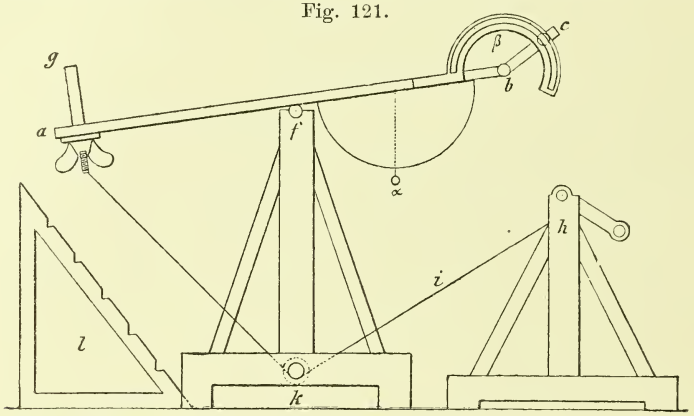
Im allgemeinen kann man sich ohne Zuhilfenahme des Gesichtssinnes über die Lage des Körpers als eines Ganzen im Raum und über die Lage der einzelnen Körperteile zueinander Rechenschaft ablegen. Auch über die Richtung und den Umfang sowohl von aktiv durch Muskelkraft wie passiv durch äußere Einwirkung erzeugten Bewegungen des Körpers als eines Ganzen oder einzelner Teile desselben vermögen wir, wiederum ohne Beteiligung einer Gesichtswahrnehmung, im allgemeinen ziemlich richtig zu urteilen.

Bei den Wahrnehmungen, um die es sich hier handelt, werden wir allerdings für gewöhnlich durch den Gesichtssinn in wirksamer Weise unterstützt, und es ist nicht zu verkennen, daß die plötzliche Ausschaltung des Sehvermögens uns zunächst ganz bedeutend desorientiert. Es gibt indessen Sinnesempfindungen, die uns, sobald wir durch Verschluß der Augen dazu veranlaßt werden, die erwähnten Wahrnehmungen über die Lage unseres Körpers in nicht allzu unvollkommener Weise gestatten. Ihre Analyse und die Frage, wie sie mit den Gesichtsempfindungen zusammen arbeiten, soll im vorliegenden Abschnitte behandelt werden.

1. Die Empfindung der Orientierung des unbewegten Körpers gegen die Vertikale.

Die präziseste Empfindung über die Lage des Körpers ist diejenige der bestimmten Orientierung zur Vertikalen (Schwererichtung). Nehmen wir der Einfachheit halber zunächst an, der Körper sei gerade gestreckt, d. h. sowohl der Kopf wie die Beine in der Verlängerung des Rumpfes. Der so gestreckte Körper sei auf einem großen Brette bequem gelagert, das um eine horizontale Achse, also in vertikaler Ebene beliebig geneigt werden kann. Ein derartiges „Zapfenbrett" (Fig. 121) hat Delage[1]) bei seinen Versuchen

Fig. 121.



Verstellbares Lagerungsbrett („Zapfenbrett") nach Delage und Aubert, zu Versuchen über die Lageempfindungen.

über die Orientierung vielfach verwendet. Die folgende Darstellung stimmt in den meisten Punkten mit derjenigen Delages überein, beruht aber durchweg auch auf eigener Beobachtung.

Gibt man dem Brette irgend eine Neigung gegen die Vertikale, so ist die Versuchsperson, die (auf dem Rücken liegend, mit geschlossenen Augen) diese Neigung natürlich mitmacht, imstande anzugeben, ob das Brett und der Körper vertikal, horizontal oder irgendwie schief liegen. Wer in Selbstbeobachtung und in Winkelgrößenbeurteilung einigermaßen geübt ist, gibt sogar mit ziemlicher Bestimmtheit den Grad der Neigung des Zapfenbrettes

[1]) Etudes expérimentales sur les illusions statiques et dynamiques de direction etc. Deutsch unter dem Titel: Physiologische Studien über die Orientierung, von H. Aubert. Tübingen 1888.

an. Leicht konstatiert man, daß man das Urteil nicht auf Grund einer Beobachtung über die Winkelgröße der mit dem Brette vorgenommenen Bewegung abgibt, sondern auf Grund des Zustandes, in dem man sich nach vorgenommener Bewegung befindet. Das Urteil über das Maß der Bewegung hält man selbst für unsicherer als das Urteil über die Lage. Man bemerkt ferner, daß man auf Grund von unter sich verschiedenen Empfindungen urteilt. Bei senkrechter oder nahezu senkrechter Körperstellung empfindet man den Druck der Unterlage gegen den Rumpf als sehr gering, bei horizontaler Lage als stark. Dafür ist im ersten Falle der Druck der Fußsohlen gegen das Fußbrett stark, im letzteren schwach. Geht man von der Horizontallagerung aus und läßt sich bald mit dem Kopf, bald mit den Füßen abwärts neigen, so empfindet man die Tendenz zum Gleiten des Körpers in der einen oder anderen Richtung; man erkennt dies an Verschiebungen zwischen den Kleidern und dem Körper, auch zwischen der Haut und den tiefer gelegenen Körperteilen. Handelt es sich um erheblichere Neigungen, so fühlt man auch deutlich, daß in den Gelenken der auf dem Brette lose aufliegenden Arme irgend etwas vor sich geht. Ist der Kopf tiefer als der Rumpf oder auch nur gleich hoch gelagert, so fühlt man Blutandrang zum Kopf; bei Stellungen, in denen der Kopf höher wie der Rumpf liegt, fällt diese Sensation weg.

Zu allen diesen Empfindungen, die mehr oder weniger deutlich auf bestimmte Körperstellen zu lokalisieren sind, tritt noch eine Empfindung, die in keiner Weise zu lokalisieren ist — ebensowenig wie eine gewöhnliche Gesichts- oder Gehörsempfindung — und die ganz entschieden den Hauptanteil an dem Gesamteindruck ausmacht. Es ist die Lageempfindung im engeren Sinne. Sie äußert sich in der Weise, daß wir, auch wenn die erwähnten anderen Empfindungen, die ein gewisses Urteil über die Körperlage ermöglichen, wegfallen, doch ein Urteil darüber fällen können, wo „oben“ und wo „unten“ ist, mit anderen Worten, wie die Richtung der Schwerelinie im Verhältnis zu unseren Körperachsen verläuft.

Der Nachweis, daß wir tatsächlich eine unmittelbare Empfindung unserer Lage zur Vertikalen haben und diese durch den Schwerezug bedingt ist, muß bei weitem schwieriger und weniger überzeugend sein als der Nachweis von der Existenz der übrigen spezifischen Sinnesempfindungen und ihren Reizursachen, weil wir den Einfluß der Schwere auf irgend ein Organ unseres Körpers nicht wie den Einfluß von Licht, Wärme und Schall experimentell ausschalten können. Dennoch glaube ich (abweichend von früher von mir geäußerten Anschauungen[1]), daß die Annahme spezifischer, von Haut- und Gelenkempfindungen unabhängiger Lageempfindungen unvermeidlich ist, und zwar auf Grund folgender Überlegungen.

Liegt man auf einer weichen Unterlage regungslos mit geschlossenen Augen, so ist man stets imstande, ein Urteil darüber abzugeben, wie die Körperlängs- und -querachse zur Vertikalen orientiert ist. Bei genauer Selbstbeobachtung erkennt man, daß die Haut- und Gelenkempfindungen durch die ruhige Lage so schwach und unbestimmt geworden sind, daß man sie überhaupt nur bei gespannter Aufmerksamkeit sich zum Bewußtsein

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 16, 398.

bringen kann. Wird die Stellung der Unterlage durch einen Anderen langsam verändert, so glaubt man in jedem Augenblicke die Lage ziemlich genau angeben zu können, man kann es sich vorstellen, wie für das Auge sich der Neigungswinkel darstellen würde. Diese Vorstellungen sind allerdings unter gewissen Bedingungen objektiv um erhebliche Beträge falsch, das tut aber hier nichts zur Sache. Wesentlich ist, daß man eine Empfindung hat, durch die man über die Lage zur Vertikalen bestimmt unterrichtet zu sein glaubt.

Die weitgehende Unabhängigkeit dieser Empfindung von den Haut- und Gelenkempfindungen kann man sich veranschaulichen, wenn man den Körper samt Extremitäten an das Zapfenbrett fest anbinden läßt, so daß der Druck der Unterlage viel stärker ist, als er durch das Körpergewicht bestimmt wird. Man kann auch durch Bänder einen Zug in bestimmter Richtung am ganzen Körper oder an einzelnen Teilen desselben anbringen, der entweder den Schwerezug unterstützt oder ihm entgegenwirkt. Durch alle diese Vorkehrungen wird die Vorstellung von der Körperlage nur sehr unwesentlich verändert. Bei beträchtlichen Neigungen wird allerdings das Gefühl des Gleitens auf der Unterlage und damit der Eindruck der geneigten Lage, wie mir scheint, durch festes Anbinden des Körpers etwas vermindert; doch ist dieser Einfluß nicht erheblich. Durch einen an irgend einem Punkte der Körperoberfläche angreifenden Zug Täuschungen über die Lage künstlich hervorzurufen, finde ich bis jetzt ganz unmöglich.

Aus all diesem folgt, daß die Lageempfindung sehr wahrscheinlich durch ein im Inneren des Körpers gelegenes Sinnesorgan vermittelt wird.

Wenn man im Bad völlig untertaucht, wirkt der Auftrieb dem Einfluß der Schwere auf den Körper als Ganzes und auf die einzelnen Extremitäten entgegen, ein Druck der Unterlage (des Bodens) auf den Körper ist nicht mehr vorhanden, auch nur ein äußerst geringer Schwerezug an den Extremitäten. Trotzdem bewahrt der Untergetauchte bei geschlossenen Augen und ohne aktives Tasten eine deutliche und bestimmte Vorstellung davon, was oben und was unten ist, mit anderen Worten eine bestimmte Empfindung seiner Orientierung zur Vertikalen.

Dies ist ein zweiter Hinweis auf ein durch die Schwere beeinflußtes Sinnesorgan im Inneren des Körpers.

Es sei schon hier darauf hingewiesen, daß nach den Erfahrungen von James (s. u. S. 789) manche Taubstumme der Fähigkeit entbehren, beim Tauchen unter Wasser noch die Vertikalrichtung zu erkennen; die unangenehme Folge, die dieser Mangel für die Betreffenden hat, das beängstigende Gefühl der Unmöglichkeit, die Richtung nach oben und unten zu unterscheiden, zeigt erst, wie bedeutungsvoll für den Normalen jene Unterscheidungsfähigkeit ist.

Über die objektive Richtigkeit bzw. Unrichtigkeit des Urteils, das man über die Orientierung zur Vertikalen bei geschlossenen Augen fällt, macht Delage (l. c.) folgende auch von Aubert bestätigte Angaben, die mit meinen eigenen Erfahrungen in der Hauptsache übereinstimmen, mit dem Unterschiede, daß ich mich nicht entschließen könnte, so bestimmte zahlenmäßige Angaben zu machen.

Liegt man auf dem Zapfenbrett auf dem Rücken, so beurteilt man die Neigung des Brettes richtig nur dann, wenn sie 50 bis 60° (Beine unten, Kopf oben) beträgt. Bei geringeren Neigungen des Brettes und somit der

Körperlängsachse gegen die Vertikale unterschätzt man die Neigung etwas. Um zu glauben, daß man um 45° geneigt sei, muß man um 50° geneigt sein. Bei Lagerungen, in denen man um mehr als 60° gegen die Vertikale geneigt ist, überschätzt man die Neigung. Gegen 75 bis 78° hält man sich für horizontal, bei 90°, d. h. wenn man wirklich horizontal liegt, glaubt man um etwa 10° nach hintenüber geneigt zu sein. Von da an steigert sich die Täuschung rasch. Um 15° nach hinten geneigt, glaubt man sich über 45° geneigt; liegt man, Kopf abwärts, um 30° unter die Horizontale geneigt, so hat man den Eindruck, als ob man direkt auf dem Kopfe stände.

Tabelle (nach Delage).

Wirklicher Winkel	Scheinbarer Winkel
0° (vertikal)	4 — 5° (Neigung nach vorn)
5° (Neigung nach hinten)	0° (vertikal)
45° „ „ „	40° (Neigung nach hinten)
50° „ „ „	45° „ „ „
60° „ „ „	60° „ „ „
75 — 78° (Neigung nach hinten)	90° (horizontal)
90° (horizontal)	90 + 10° = 100° (Kopf abwärts)
90 + 15° = 105° (Kopf abwärts)	90 + 45° = 135° „ „
90 + 30° = 120° „ „	90 + 90° = 180° (vertikal, Kopf nach unten)

Statt einfacher Angaben über die geschätzte Größe des Neigungswinkels verwandte Delage auch die Markierung der für vertikal gehaltenen Richtung durch einen in der Hand gehaltenen Stab.

Bei diesen Lagebeurteilungen ist die Stellung des Kopfes zum Rumpf von nennenswertem Einfluß. Beugung des Kopfes nach vorn vergrößert die Fehler, die bei Beurteilung der Neigung von 0 bis 60° begangen werden, verkleinert sie jenseits 60°. Rückwärtsbeugung wirkt gerade entgegengesetzt (Delage). Ich fand bei genau horizontaler Lage im ganzen, aber durch ein Kissen unterstütztem Kopfe, die Überschätzung der Neigung nur unbedeutend, doch immer noch nachweisbar, auch wenn ich das Brett mehrfach um die Horizontallage herum hatte oszillieren lassen, so daß eine Desorientierung über die wahre Lage eintrat.

Auf dem Zapfenbrette Delages kann man auch die Lageempfindungen in der reinen Seitenlage studieren, wobei eine Drehung des Körpers um die sagittale Achse zur Wirkung kommt. Delage und Aubert sagen hierüber, daß die Täuschungen hier dieselben wie in der Rückenlage zu sein scheinen. Ich habe die Beobachtungen in der Seitenlage besonders bevorzugt, weil sie sich zur Kombination mit Beobachtungen über die optische Orientierung zur Vertikalen besonders eignen. Die oben erwähnten Erfahrungen über die Unter- bzw. Überschätzung der Körperneigung fand ich auch in diesem Falle bestätigt.

Sachs und Meller[1]) haben die Beobachtungen über Wirkung sagittaler Drehungen erleichtert, indem sie den Körper der Versuchsperson an ein um

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **31** (1903).

eine horizontale Achse drehbares Brett festschnallten. Das jeweilige Urteil über die Lage wurde dadurch markiert, daß mit den Händen ein kurzer Stab auf „scheinbar vertikal“ eingestellt wurde.

Weil hierbei die Stabstellung mittels der tastenden Hände kontrolliert und reguliert wird, sprechen Sachs und Meller von „haptischer“ Lokalisation im Gegensatz zur optischen. Der Ausdruck ist unzutreffend: Die Lageempfindung gibt uns ein (richtiges oder falsches) Urteil über die Orientierung unseres Körpers. Die tastenden Hände kontrollieren die Lage des Stabes zum Körper, nicht zur Vertikalen. Der Tastsinn hat mit der Orientierung zur Vertikalen nichts zu tun.

Sachs und Meller haben ihre sagittalen Drehungen, wie es scheint, nur bis zu 60° durchgeführt und zum Teil wohl infolge dieser Beschränkung nicht den Umschlag der Lagetäuschung bemerkt, der, wie oben bemerkt, etwa bei 60° Neigung in Rücken- wie Seitenlage stets eintritt. Sie geben an, daß bei Seitwärtsneigung des ganzen Körpers die scheinbare Vertikale (ihre „haptische“ Vertikale) nach der gleichen Seite geneigt geschätzt, die Neigung also unterschätzt wird. Dies gilt aber nur für mäßige Neigungen, bei stärkeren ist das Gegenteil der Fall.

Von größerem Interesse sind die Versuche von Sachs und Meller über getrennte Kopf- und Körperneigungen in sagittaler Ebene. Auch hier wurde wieder das Urteil über die scheinbare Vertikale durch entsprechende Stabhaltung markiert. Bleibt der Kopf, durch Gebißhalter fixiert, vertikal, und der auf dem Brett aufgeschnallte Körper wurde um die sagittale Achse schief gestellt, so wird die Neigung überschätzt, z. B. bei (tatsächlich) 40° um 10°, bei 60° um 15°. Wurde der Körper vertikal gelassen, dagegen der Kopf um die sagittale Achse seitwärts geneigt, so wird die Neigung unterschätzt, bei 40° um 3°, bei 60° um 6°.

Über die Beziehungen zur optischen Lokalisation s. unten.

Versuche, die den Einfluß schiefer Kopfhaltung auf die Lagebeurteilung mittels des in den Händen gehaltenen Stabes zum Ausdruck bringen, sind übrigens schon von Delage, dann auch von Breuer[1]) und mir[2]) ausgeführt worden. Delage ließ die Versuchspersonen mit verbundenen Augen an einem in den Händen gehaltenen Stabe die senkrechte Richtung und die Medianrichtung („geradeaus“) anzeigen, bei gewöhnlicher Kopfhaltung und bei starker Drehung des Kopfes um eine der drei Achsen. Er fand, daß sich die Versuchspersonen dann in dem Sinne täuschten, daß die vorgenommene Kopfdrehung überschätzt wurde: bei Kopfneigung nach rechts wich der Stab, der die Vertikale angeben sollte, oben nach links von der wahren Vertikalen ab, bei Neigung nach hinten wich der Stab oben nach vorn ab usf. Breuer bestätigt diese Beobachtungen, soweit sie Neigungen des Kopfes um die sagittale und transversale Achse betreffen, nicht aber bei Drehungen um die longitudinale (vertikale) Achse. Ich habe bei solchen Versuchen sehr inkonstante Resultate erhalten, bald im Sinne Delages oder Breuers, bald auch ganz regellos. Bei frei stehendem Körper und freier Haltung des Stabes in den Händen erscheint mir die Methode zu unvollkommen, um die Gewinnung zuverlässiger Resultate zu gestatten.

---

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **48** (1891). — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **16** (1898).

v. Cyon[1]) hat ähnliche Versuche angestellt, bei denen die Versuchsperson mit verbundenen Augen an senkrechter Wand senkrechte und wagerechte Striche (mit Hilfe eines Lineals) zu zeichnen hatte, einmal bei aufrechter, dann bei seitlich geneigter Kopfhaltung. Abgesehen von gewissen konstanten persönlichen Fehlern ergab sich das mit den oben erwähnten Erfahrungen übereinstimmende Resultat, daß bei Linksneigung des Kopfes die Vertikale mit dem oberen Ende nach rechts abweichend gezeichnet wurde.

2. Die Beziehungen zwischen den Lageempfindungen und der optischen Orientierung.

Die Orientierung durch die Augen ist von der Orientierung durch die allgemeinen Lageempfindungen in hohem Grade unabhängig, wie sich am deutlichsten an den möglichen Täuschungen bei diesen Wahrnehmungen zeigt.

An einer geraden Linie, die wir als einziges unterscheidbares Objekt auf sonst ganz gleichförmigem Grunde einer senkrechten Wand sehen, erkennen wir deutlich eine bestimmte Richtung im Verhältnis zur Vertikalen. Schon sehr kleine Abweichungen von der Vertikalen werden erkannt, von mir z. B. solche von 1^0, bei einer Lichtlinie von 40 cm Länge auf absolut dunklem Grunde aus 2 m Entfernung gesehen. Für manche Personen scheint die tatsächliche Vertikale namentlich bei monokularer Betrachtung nicht vertikal, sondern sie machen bei der Vertikaleinstellung einen konstanten Fehler.

Einen extremen Fall dieser Art haben Sachs und Meller[2]) beschrieben. Die wirklich vertikale Lichtlinie erschien bei binokularer Betrachtung vertikal, bei monokularer Betrachtung dagegen um 14^0 seitwärts geneigt. Sachs und Meller nennen diese Erscheinung „Inkongruenz der Netzhäute". Man könnte auch von einer Art Rotationsschielen sprechen.

Bei Seitwärtsneigung des Kopfes oder des ganzen Körpers (der auf dem Zapfenbrett Delages in Seitenlage liegen kann, oder wie bei den Versuchen von Sachs und Meller an ein Brett angeschnallt wird, das um eine horizontale Achse drehbar ist) sieht man die wahre Vertikale schief, in entgegengesetztem Sinne geneigt, als es der Körper ist (Aubert[3]).

Mit steigender Neigung nimmt die scheinbare Schiefheit zu, doch nicht proportional und ohne Konstanz. Bei Kopfneigung zur Schulter um 0 bis 40^0 pflegt das „Aubertsche Phänomen" noch nicht aufzutreten, die Vertikale erscheint vertikal. Bei stärkerer Neigung tritt das Phänomen plötzlich auf und bleibt auch bei beliebig lange dauernder Seitenlage bestehen. In horizontaler Seitenlage erscheint für die meisten Beobachter die wirklich vertikale Lichtlinie um etwa 20 bis 40^0 geneigt, und zwar im umgekehrten Sinne wie der Beobachter. Man hält also eine Richtung für senkrecht, die in Wirklichkeit um 20 bis 40^0 nach derselben Seite geneigt ist wie der Beobachter, mit anderen Worten man unterschätzt optisch die Neigung um jenen Betrag. Gleichwohl hat man zur selben Zeit auf Grund der allgemeinen Lageempfindung die Vorstellung um mehr als 90^0 gegen die Vertikale geneigt zu sein (Delage, s. o. S. 739), überschätzt also in dieser Hinsicht die Neigung. Letzteres geschieht auch bei offenen Augen, während man die Lichtlinie betrachtet. Die Gesichtstäuschung wie die Lagetäuschung verschwinden indessen sofort (erstere vollständig, letztere teilweise, in wechselndem Maß), wenn im Gesichtsfeld Objekte sichtbar sind, deren Stellung zur Vertikalen wir durch Erfahrung gut kennen, z. B. Möbel, Fenster oder Türen.

---

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. 94 (1903). — [2]) Arch. f. Ophthalm. 57 (1904). — [3]) Arch. f. path. Anat. 20 (1860).

Da im allgemeinen die Fähigkeit, einen rechten Winkel richtig zu schätzen, ziemlich gut ist, vermag man auch über die Horizontale, als auf der Vertikalen senkrecht stehende Richtung, mit dem Auge recht sicher zu urteilen; die Genauigkeit, mit der man eine isoliert gesehene Linie wirklich horizontal zu stellen vermag, ist darum nur wenig geringer als die Genauigkeit der Vertikaleinstellung.

Wesentlich anders gestalten sich die Dinge beim Blick auf eine nicht vertikale Ebene. Blickt man z. B. auf dem Rücken liegend nach der Zimmerdecke, so erkennt man alsbald einen tiefgreifenden Unterschied gegen die vertikale Fläche: es gibt auf dieser horizontalen Ebene keine bevorzugte Richtung, in die man eine frei bewegliche Linie ohne Vergleichsobjekt mit ähnlicher Sicherheit einstellen könnte wie die Vertikale in der vertikalen Fläche. Bei aufrechter Körperstellung fällt die Vertikalrichtung mit der Körperlängsachse zusammen; in der Rückenlage ist die Richtung der Körperlängsachse im Gesichtsfeld aber keineswegs so ausgeprägt, daß man einen an der Decke angebrachten drehbaren Zeiger auch nur annähernd so genau in die Längsachse einstellen könnte wie bei aufrechter Stellung. In letzterer hat man eine tatsächliche optische Empfindung der vertikalen Richtung, für die auf der horizontalen Ebene jedes Analogon fehlt.

Diese Tatsache weist aufs bestimmteste auf die Mitwirkung eines durch die Gravitation beeinflußten Organes hin (s. u. S. 790 ff).

Mach[1]) spricht von der Empfindung der bevorzugten „Symmetrielage" einer Geraden, die von dem Körper in dessen Längsrichtung gesehen wird. Jede andere Stellung der Geraden soll als „Schieflage", als Abweichung von der Symmetrielage empfunden werden. Ich finde, daß hiervon sehr wenig übrig bleibt, wenn 1. die Symmetrielage zufolge der Körperstellung nicht mit der Vertikalen zusammenfällt und wenn 2. im Gesichtsfelde die betreffende Gerade das einzige hervortretende Objekt ist, der eigene Körper aber und die nächste Umgebung der Gesichtswahrnehmung entzogen sind. Liegt man z. B. auf dem Bauch auf einem Tische, schließt das eine Auge und blickt mittels des anderen durch ein dicht ans Gesicht angedrücktes Rohr über den Tischrand nach dem Fußboden hinab, so hat man (abgesehen von den ersten Momenten), von Dielen, die nicht in der Symmetrierichtung des Körpers oder Kopfes verlaufen, keineswegs den Eindruck einer Schieflage. Alle Richtungen sind unter sich gleichwertig; ganz anders, wenn man in ähnlicher Weise durch ein Rohr gegen die senkrechte Wand blickt: da gibt es eine gut markierte senkrechte, eine wagerechte Richtung, alle anderen sind „schief".

Die Symmetrielage nehmen wir also nur wahr, solange wir unseren Körper deutlich und bewußt wahrnehmen.

3. Die Orientierung des bewegten Körpers gegen die Vertikale.

Wenn der in objektiv unveränderter Orientierung gegen die Vertikale verharrende Körper passiv bewegt wird, wird der subjektive Eindruck der Lage (Orientierung) unter gewissen Umständen merklich verändert, es treten Täuschungen über die Lage zur Vertikalen ein. Da diese Lagetäuschungen weiter unten doch zur Besprechung kommen müssen, seien sie hier nur in aller Kürze erwähnt.

Während der Rotation auf einer karussellartigen Vorrichtung empfindet man (bei geschlossenen Augen) als vertikal eine Richtung, die von der wahren Vertikalen nach der Resultante aus Gravitations- und Centrifugalbeschleuni-

[1]) Die Analyse der Empfindungen. IV. Aufl., 1902, S. 95.

gungsrichtung hin abweicht (Mach). Diese Täuschung besteht sowohl bei gleichförmiger wie bei ungleichförmiger Drehung.

Bei geradliniger Progressivbewegung fehlt eine analoge Lagetäuschung sicher, solange die Bewegung eine gleichförmige ist. Ob bei ungleichförmiger Bewegung Lagetäuschungen auftreten, steht nicht fest.

Bei Drehbewegungen unterliegen wir auch Täuschungen über die Stellung der gesehenen Objekte zur Vertikalrichtung (Purkinje). Es ist eine bekannte Erfahrung, daß beim schnellen Durchfahren von Kurven in der Eisenbahn die Häuser usw., die man vom Wagen aus sieht, schief zu stehen scheinen. Auch bei der Karussellbewegung trifft dies zu; die wahre Vertikale wird als schief gesehen, als annähernd vertikal erscheint ein Pendel, das auf dem Karussell mit rotiert und sich in die Resultante aus Gravitations- und Horizontal-(Centrifugal-) Beschleunigung einstellt (Mach).

Breuer und Kreidl[1]) haben gezeigt, daß diese Verdrehung der optischen Vertikale auf einer realen Raddrehung der Augen beruht, deren man sich nicht bewußt wird.

Viele Taubstumme unterliegen dieser Täuschung nicht, die wahre Vertikale bleibt für sie auch in der Karussellvorrichtung scheinbar vertikal (Kreidl[2]).

4. Die Empfindung der Lage der einzelnen Körperteile.

Auf diesem Gebiete ist unser Wissen zurzeit noch lückenhafter wie auf den bisher besprochenen.

Im allgemeinen sind wir, ohne Zuhilfenahme des Gesichtssinnes, imstande, uns über die Lage der einzelnen (äußeren) Teile unseres Körpers zueinander Rechenschaft zu geben. Wir wissen, ob der Arm oder das Bein in seinen verschiedenen Gelenken gebeugt oder gestreckt ist, wir vermögen uns auch den Grad der Beugung einigermaßen klar zu machen. Das gleiche gilt auch für die Stellung der Finger, des Kopfes und Rumpfes, der Lippen, weit weniger schon für die Zehen und die Zunge. Von einigen anderen, ebenfalls willkürlich bewegbaren Teilen, wie Gaumensegel und Kehlkopf, erhalten wir überhaupt keine direkten Stellungs- oder Lageempfindungen.

Bei näherer Überlegung ergibt sich, daß eine genauere Vorstellung von den Stellungen unserer willkürlich aktiv bewegbaren Körperteile nur in den Fällen überhaupt möglich ist, in denen unter normalen Verhältnissen die Kontrolle durch den Gesichtssinn möglich ist. Teile, deren Stellung wir nie oder nur selten durch den Gesichtssinn wahrnehmen, ergeben auch keine bestimmten Lage- oder Stellungsempfindungen. Zur Gesamtvorstellung einer bestimmten Gelenkstellung gehört also für den Normalsinnigen die Vorstellung vom Gesichtsbild des mehr oder weniger gebeugten Gelenkes. Interessant ist in dieser Hinsicht unser Verhalten gegenüber der Zehenstellung. Obwohl jedermann in der Lage sein wird, zu beurteilen, ob die ganze Zehenreihe im Metatarso-phalangealgelenk gestreckt oder gebeugt ist, werden wohl die wenigsten eine durch Lageempfindung begründete Vorstellung davon haben, in welcher Stellung die einzelnen Phalangengelenke stehen, falls es sich nicht um passiv erzeugte ungewöhnliche Stellungen handelt. Ich glaube,

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **70**, 494. — [2]) Ebenda **51**, 133.

daß hierbei neben der durch die Fußbekleidung erzeugten Verkümmerung der Zehenbewegung die Tatsache entscheidend ist, daß wir den größten Teil unseres Lebens hindurch die Zehenstellung weder durch den Gesichtssinn, noch durch das Betasten mit den Händen genau kennen lernen. Von der Stellung der Zunge im Munde wissen wir nur das, was uns der Tastsinn der Zungenspitze und der sonstigen Mundschleimhaut zu erkennen gibt, von den Verschiebungen der hinteren Zungenteile weiß der Laie ebensowenig wie von den (doch willkürlich erzeugbaren) Bewegungen des Gaumensegels. Wer imstande ist, die Ohrmuschel willkürlich zu bewegen, erfährt nur durch den Spiegel, welche Bewegungen er durch den Willensimpuls erzeugt. Das gleiche gilt von den Bewegungen der Nasenflügel, ja in gewissem Maße selbst von anderen mimischen Bewegungen. Von der Augenstellung sei hier nur erwähnt, daß wir uns auch ihrer nur in recht unvollkommener Weise bewußt sind.

Sicherlich ist die Quelle unserer Erfahrung über die Gelenkstellungen nicht allein der Gesichtssinn (das beweisen die Blinden, die z. B. über ihre Arm- und Fingerstellungen nicht im unklaren sind). Auch mit Heranziehung der Hautsensibilität, des Betastens mit den Händen, haben wir offenbar noch nicht das Ursprungsgebiet für die Empfindungen der Gliederlagen erschöpft; wir werden vielmehr gezwungen, noch Empfindungen anzunehmen, die im Innern der Glieder oder, allgemeiner gesagt, der beweglichen Körperteile ihren Ursprung haben.

Absolute Unempfindlichkeit der Haut eines Gliedes, wie sie bei Hysterie und Syringomyelie vorkommt, nimmt nach allgemeiner Erfahrung nicht die Möglichkeit, bei geschlossenen Augen über die Stellung des betreffenden Gliedes ein Urteil abzugeben. Wohl aber tritt die Unmöglichkeit hierfür ein, wenn auch die „tiefe Sensibilität", die Gesamtheit der Empfindungen von Muskeln, Sehnen und Gelenken wegfällt. Den Beweis hierfür hat hauptsächlich Goldscheider geliefert, auf dessen Untersuchungen weiter unten, S. 760, einzugehen sein wird.

Überaus lehrreich sind auf diesem Gebiete die seltenen Fälle von vollkommener Aufhebung der Sensibilität eines Gliedes bei erhaltener Motilität. Einen solchen Fall, der die betreffenden Erscheinungen in ungewöhnlicher Reinheit zeigte, hat kürzlich Strümpell[1]) sorgfältig untersucht und beschrieben.

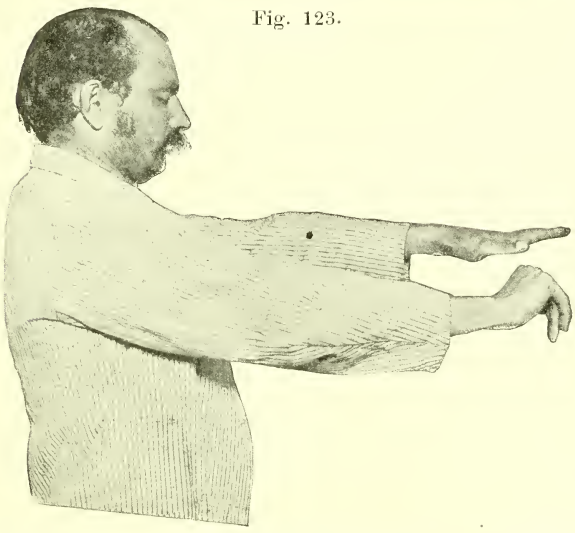
Es handelte sich um eine Stichverletzung des Halsmarks (die in Heilung ausging). Am rechten Arm (mit Ausnahme der Schultergegend) war die Empfindlichkeit in allen Sinnesqualitäten aufgehoben, die Motilität aber erhalten. Die Diagnose lautete daraufhin auf Durchtrennung des rechten Hinterhorngraus und des äußeren Teiles des rechten Hinterstranges. Wir berücksichtigen hier nicht die erheblich umfangreicheren Störungen in den ersten Wochen und Monaten nach der Verletzung, sondern nur diejenigen des rechten Armes, die noch nach $^3/_4$ Jahren in deutlicher Weise zum Ausdruck kamen. Der Patient weiß bei geschlossenen Augen nicht, ob der Arm und die Finger gebeugt oder gestreckt sind. Er ist nicht imstande, die Hand bei geschlossenen Augen in einer bestimmten Stellung zu halten, sie geht vielmehr allmählich in eine gekrümmte Haltung über, ohne daß der Patient etwas davon empfindet. Auf die Störungen in den aktiven Bewegungen werde ich unten zurückkommen.

[1]) Deutsche Zeitschr. f. Nervenheilk. **23** (1902).

Dieser seltene Fall ergibt das klare Resultat, daß bei Aufhebung der oberflächlichen und der tieferen Sensibilität von Hand und Unterarm die völlige Unmöglichkeit besteht, unter Ausschluß des Sehvermögens eine

Fig. 122.

Fig. 123.



Nach Strümpell. Der Patient mit vollständiger Sensibilitätslähmung am rechten Arm vermag bei offenen Augen beide Hände in die gleiche Stellung zu bringen und so zu erhalten. Bei geschlossenen Augen verändert die rechte Hand ohne Wissen und Willen des Patienten ihre Stellung in der durch die Figur dargestellten Weise.

direkte Wahrnehmung der Hand- und Fingerstellung zu gewinnen. Aus leicht begreiflichen Gründen muß es noch viel seltener gelingen, Fälle zur Beobachtung zu bekommen, bei denen rein nur die oberflächliche oder nur die

tiefe Sensibilität vernichtet ist, und geeignete, auf diese Fragen hin gut beobachtete Fälle sind mir hiervon nicht bekannt. Daß in manchen sorgfältig untersuchten Fällen von Hautanästhesie, z. B. bei Syringomyelie, weder der erwähnte Mangel des Stellungsbewußtseins, noch die (im Strümpellschen Falle sehr evidente), Ataxie oder Koordinationsstörung erwähnt wird, spricht dafür, daß diese Erscheinungen in jenen Fällen tatsächlich fehlten. Hysterische Anästhesien aber sind, wie Strümpell mit Recht betont, zur Beurteilung der hier interessierenden Fragen nur in beschränktem Maße verwertbar, weil es sich bei ihnen offenbar um Störungen in den höheren Zentren des Gehirns handelt, die weit kompliziertere Bedingungen setzen als die einfachen peripheren oder im Rückenmark bedingten Empfindlichkeitsstörungen.

Aus dem Schlaf oder Halbschlaf erwachend ist man zuweilen für einen Augenblick außerstande, sich zu vergegenwärtigen, wie die einzelnen Extremitäten gelagert sind. Bei der geringsten Bewegung, die man beim vollen Erwachen kaum vermeiden kann, tritt aber die richtige Vorstellung der Lage wieder ein. Es fragt sich nun: hat man während des Schlafens die zuvor eingenommene Stellung vergessen und ist es unmöglich, bei absolut ruhiger Lage eine Lageempfindung zu haben, oder ist im Moment des Erwachens noch eine wirkliche partielle Empfindungslähmung vorhanden, die Ungewißheit über die Lage also eine Folge des unvollkommenen Wachseins? Mir scheint ein sicherer Anhalt zur Beantwortung dieser Frage zu fehlen. Partielle Empfindungslähmungen im halbwachen Zustande existieren wohl zweifellos, so gut wie in der unvollkommenen Narkose. Anderseits erscheint es jedoch auch durchaus nicht unwahrscheinlich, daß wir bei völliger Regungslosigkeit auch im wachen Zustande keine Empfindung der Lage der Glieder (überhaupt keine Lageempfindung außer der Orientierung gegen die Vertikale) hätten. Dieser Zustand kommt für den normalen Menschen, der intakte Motilität besitzt, nicht zur Beobachtung, weil eine solche völlige Regungslosigkeit nie vorhanden ist und man namentlich bei Aufmerksamkeit auf den Zustand eines Gliedes kleinere unmerkliche Bewegungen mit demselben wohl nicht vermeiden kann. Vielleicht läßt sich bei einer motorischen Lähmung eines Gliedes über diese Frage etwas Sicheres ermitteln.

Die Empfindungen, die man beim aktiven Betasten eines Gegenstandes hat, gehören nur zum Teil dem eigentlichen Tastsinn an. Die Tastempfindungen oder, genauer ausgedrückt, die durch mechanische Reizung der Hautsinnesnerven ausgelösten Berührungsempfindungen reichen nicht aus, um uns die Gestalt und Größe eines Gegenstandes erkennen zu lassen, der auch nur einige Centimeter lang ist. Wir bedürfen vielmehr zur Orientierung über die Gestalt und Ausdehnung des Getasteten entweder der direkten Wahrnehmung der gegenseitigen Lage mehrerer gleichzeitig tätiger Tastflächen oder der Wahrnehmung und Abschätzung der beim Tasten ausgeführten Bewegungen. Entsprechend unserer Grundeinteilung soll hier nur die erstere Seite des Problems kurz berührt werden. Befinden sich die Finger einer Hand in irgendwelcher Stellung zueinander, unbewegt, wie wir hier voraussetzen, und werden mehrere Stellen der Finger durch einen Gegenstand berührt, z. B. durch eine Kugel, die eine andere Person an unsere Hand heranbringt, so sind wir, ohne mit den berührten Fingern aktiv zu tasten, imstande, ein ungefähres Urteil über die Größe und Gestalt des

berührten Gegenstandes abzugeben, infolge davon, daß wir über die gegenseitigen Abstände der einzelnen gleichzeitig gereizten Hautpartien orientiert sind. Da es sich, der Voraussetzung nach, hierbei nicht nur um verschiedene Punkte an ein und demselben Fingerglied handelt (also Punkte, deren Distanz im wesentlichen immer konstant bleibt), sondern auch um Punkte an verschiedenen Fingern, müssen wir, da wir bei der angedeuteten Berührung der Finger mit der Kugel tatsächlich die Empfindung eines körperlichen, räumlich ausgedehnten Gegenstandes haben und an diesem bestimmte Dimensionen erkennen, die Stellung der Finger zueinander bei jener Wahrnehmung in Anrechnung bringen, auch wenn wir sie uns nicht zuvor bewußtermaßen klar gemacht haben. Die gleichzeitige Berührung zweier Punkte des Handrückens erzielt den Eindruck einer einigermaßen bestimmten Distanz, die gleichzeitige Berührung der Spitze des Daumens und Zeigefingers zwar im einzelnen Falle ebenfalls, aber je nachdem letzterenfalls die beiden Fingerspitzen bei der Berührung sich nahe oder fern standen, erkennt man ohne weiteres die Distanz der berührenden Objekte als mehr oder weniger groß. Ob wir also wirkliche Empfindungen der Lage einzelner Glieder zueinander haben oder nicht — die Berührungsempfindungen ergeben jedenfalls ein verschiedenes Wahrnehmungsresultat je nach der tatsächlichen Lage der berührten Glieder zueinander [1]).

Die Frage, ob derartige Lageempfindungen existieren, kann meines Erachtens mit dieser Konstatierung nicht als entschieden bezeichnet werden. Es könnten je nach der Gliederstellung verschiedene centripetale Innervationsströme auf die Tastwahrnehmungen Einfluß gewinnen, ohne daß man sich ihrer auf irgend eine Weise bewußt werden könnte, so wie gewisse centripetale Erregungen, die vom Labyrinth ausgehen, auf die Augenstellung und damit auf die Gesichtswahrnehmungen Einfluß haben. Anderseits erscheint mir aber auch die Hypothese nicht widersinnig, daß uns eine bestimmte Empfindungskategorie gegeben sei, ohne daß wir uns dessen klar bewußt sein müssen. Man kann für eine kombinierte Wirkung mehrerer Sinnesorgane halten, was eine Empfindung eigener Art ist; die Empfindung der Orientierung gegen die Vertikale ist, wie oben auseinandergesetzt wurde, eine besondere Empfindungsqualität. Ich bin der Überzeugung, daß reine psychologische Analyse und Selbstbeobachtung uns über diese Frage keine Klarheit wird schaffen können; ich sehe auch keine Möglichkeit, wie das psysiologische Experiment Entscheidung liefern könnte. Die Pathologie allein, Beobachtung von Fällen mit entsprechend begrenzten Ausfallserscheinungen werden hier das letzte Wort zu sprechen haben. Fördert doch ein einziger gut beobachteter Fall, wie der erwähnte Strümpellsche, unendlich viel mehr als das viele, was an theoretischen Betrachtungen für und wider in der Literatur niedergelegt worden ist.

Auf die Beteiligung der Hautempfindungen bei der Wahrnehmung der Extremitätenstellung einzugehen unterlasse ich an dieser Stelle, da dieser Faktor in dem nachfolgenden Kapitel behandelt wird.

---

[1]) Es sei hier daran erinnert, daß die Größenschätzung mittels der Augen in beträchtlichem Grade von dem Spannungszustande oder der Stellung der Augenmuskeln (der inneren wie der äußeren) beeinflußt wird.

II. Die Bewegungsempfindungen.

1. Die Empfindung der Bewegung des ganzen Körpers.

Die Empfindung der Bewegung des ganzen Körpers kann rein nur zur Geltung kommen, wenn es sich um passive Bewegung handelt, da jede aktive Bewegung zugleich Verschiebung der einzelnen Teile gegeneinander und davon abhängige komplizierende Verhältnisse bedingen muß.

Wir unterscheiden die geradlinige Progressivbewegung und die Drehbewegung; jede Bewegung in krummer Bahn läßt sich aus diesen beiden Bewegungsarten zusammengesetzt denken.

Mach[1]) hat darauf aufmerksam gemacht, daß wir eine Progressivbewegung sowohl wie eine Drehbewegung (mit Ausnahme eines ganz speziellen Falles, der unten erwähnt wird) bei geschlossenen Augen nur wahrnehmen können, solange sie nicht gleichförmig ist, sondern eine positive oder negative Beschleunigung erfährt. Betreffs der Progressivbewegung ist dieses Machsche Gesetz aus der alltäglichen Erfahrung leicht als richtig zu erkennen. Im Eisenbahnzuge, besser noch auf einem Dampf- oder Segelschiffe, ist man bei geschlossenen Augen gänzlich außerstande, die Fahrtrichtung wahrzunehmen, solange nicht das Tempo merklich beschleunigt oder verlangsamt wird. Nachts auf freiem Felde im Eisenbahnzuge fahrend kann man sich selbst bei offenen Augen willkürlich in die Situation des Vorwärts- oder Rückwärtsfahrens hineindenken, unmöglich jedoch während der Zug anfährt oder die Fahrt verlangsamt. Über die Täuschung bezüglich der Bewegungsrichtung, die im Falle der Fahrtverlangsamung auftreten kann, vgl. unten S. 749.

Um das Machsche Gesetz auch für Drehbewegungen als gültig zu erweisen, bedarf es besonderer Versuchsanordnungen, die dem Körper eine gleichförmige Drehbewegung zu geben gestatten. Mach, Delage und Aubert haben solche angegeben. Das Gesetz scheint in aller Strenge gültig zu sein. Die Bemerkung Delages, daß es erst längerer Bewegung bedürfe, um die Bewegungsempfindung verschwinden zu lassen, trifft nur insofern zu, als alle Apparate zur Erzeugung einer Progressivbewegung oder Drehung des Körpers infolge der Trägheit diesem erst allmählich eine wirklich gleichförmige Bewegung erteilen können. Wir werden nicht zweifeln, daß im selben Moment, in dem die Gesamtmasse des Körpers in gleichförmige Bewegung gesetzt und das durch den Bewegungsbeginn gestörte innere Gleichgewicht der Organe wiederhergestellt ist, die Bewegungsempfindung verschwindet. Darin hat nun allerdings Delage recht, daß bei den aktiven Bewegungen, die wir ausführen können, niemals die Bedingungen gegeben sind, unter denen die Bewegungsempfindung verschwindet; beim gleichmäßigsten Gange oder Lauf, bei der gleichmäßigsten Drehung im Tanz ist doch immer noch so viel Ungleichmäßigkeit vorhanden, ein so rascher Wechsel positiver und negativer Beschleunigung, daß diese stets empfunden werden wird.

Von großer theoretischer Bedeutung ist die Beobachtung Machs, daß man, in passiver gleichförmiger Bewegung befindlich, die Bewegung alsbald wieder wahrnimmt, sobald man den Körper oder auch nur den Kopf dreht.

[1]) Sitzungsber. K. Akad. Wien 1873, und Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen. Leipzig 1875.

Man bestätigt dies leicht, wenn man, im Eisenbahnabteil liegend, von der Seitenlage in die Rückenlage übergeht oder umgekehrt. Man empfindet dann einen Augenblick die Bewegung und erkennt ihre Richtung.

Infolge einigermaßen längerer gleichförmiger Bewegung tritt bei und nach plötzlichem Anhalten oder auch nur merklicher Verlangsamung unter Umständen zwingend die Empfindung der gegensinnigen Bewegung auf (Mach). Aktiv ist solche Nachempfindung nur durch rasche Drehbewegung zu erzeugen.

Völlige Gleichförmigkeit der Bewegung ist übrigens kein Erfordernis für Erzeugung der Nachempfindung.

Passive Drehbewegung und passive Progressivbewegung in vertikaler Richtung ergeben die günstigsten Bedingungen für das Entstehen gegensinniger Bewegungsempfindung während der objektiven Verzögerung der Bewegung oder nach dem Aufhören einer objektiven Bewegung.

Für die geradlinige Progressivbewegung in horizontaler Ebene ist diese scheinbare Bewegungsumkehr nicht leicht zu beobachten, hauptsächlich deshalb, weil unter den relativ günstigsten Bedingungen (rasches Anhalten eines Eisenbahnzuges) zu starke konkurrierende Empfindungen neben der spezifischen Bewegungsempfindung auftreten. Das Vorwärtsgleiten des Gesäßes auf dem Sitze und die erfahrungsmäßige Bekanntschaft mit den Begleiterscheinungen des Anhaltens (Bremsgeräusch usw.) lassen die spezifische Bewegungsempfindung im umgekehrten Sinne der wahren Bewegung nicht leicht zum Bewußtsein kommen. Analoge Fälle von Hemmung der Sinneseindrücke ließen sich aus anderen Gebieten der Sinnesphysiologie in großer Zahl anführen und nehmen den beschriebenen Beobachtungen, die nur unter günstigen Bedingungen gemacht werden können, nichts von ihrer theoretischen Bedeutung.

v. Cyon und Delage bestreiten die Empfindung der Bewegungsumkehr in der Eisenbahn. Delage macht übrigens das wichtige Zugeständnis, daß bei starken negativen Beschleunigungen solche Empfindungen doch eintreten könnten, und gibt einen Fall an, wo er, mit Lesen beschäftigt, wirklich den Zug in umgekehrter Bewegung glaubte, während er nur die Fahrt sehr verlangsamte.

Eigentümlich und mit der Machschen gegensinnigen Nachempfindung nicht zusammen zu werfen ist die bekannte Nachempfindung nach anhaltenden rhythmischen Bewegungen. Nach bewegter Seefahrt kann man oft stundenlang die rhythmische Auf- und Niederbewegung empfinden [1]).

Die für gewöhnlich willkürlich ausgeführten Bewegungen sind viel zu kurzdauernd, um zu einer Nachempfindung zu führen.

Ein annäherndes Maß der Empfindlichkeit für Drehbeschleunigungen gewann Mach, indem er sich auf einen horizontalen Stab setzte, der um eine vertikale Achse oszillierende Drehungen ausführte, deren Dauer und Umfang variiert werden konnten: für Mach wurden diese Schwingungen unmerklich, wenn die Schwingungsdauer 14 Sekunden, das Exkursionsmaximum

[1]) Es wird hier dem Nervensystem ein nachdauernder rhythmischer Vorgang aufgezwungen, ähnlich wie manche nyktitropisch reagierenden Pflanzen ihre Nyktitropie, d. h. rhythmische Bewegungen, die mit dem Wechsel von Nacht und Tag zusammenhängen, auch bei konstanter Helligkeit oder Dunkelheit noch tagelang beibehalten.

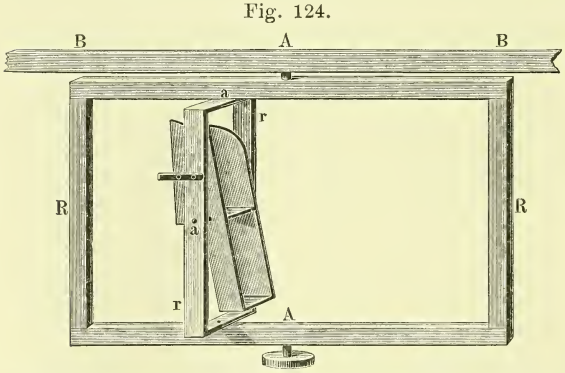
10^0 betrug. Für einen anderen Beobachter betrugen die entsprechenden Zahlen 16 Sekunden und 13^0. Der Schwellenwert der Winkelbeschleunigung liegt hiernach zwischen 2 und 3^0.

Delage-Aubert geben an, daß bei passiver Rotation des horizontal liegenden Körpers um die vertikale Achse noch Drehungen im Betrage von 2^0 Winkelgeschwindigkeit pro Sekunde empfunden werden können. Das steht mit Machs Erfahrungen in Widerspruch, da nach Mach nur die Winkelbeschleunigung, nicht aber die Winkelgeschwindigkeit maßgebend für die Drehungsempfindung ist. Die Angabe dürfte also mit größter Vorsicht aufzunehmen sein. Brauchbarer ist die Angabe Delages, daß er, in einer Seilschaukel sitzend, noch bei Ausschlägen der Schaukel von etwa $^1/_2{}^0$ eben eine Bewegungsempfindung hatte. Hier handelt es sich um wechselnd positive und negative Beschleunigungen.

Die Richtung der positiven Beschleunigung wird stets empfunden, wenn überhaupt Bewegungsempfindung eintritt. Ist die Beschleunigung eine negative, so wird, wie erwähnt, die wahre Bewegungsrichtung nicht empfunden, sondern es tritt die Täuschung gegensinniger Bewegung auf, diese aber zwingend, falls keine konkurrierenden Momente vorliegen.

Bei Bewegungen des Gesamtkörpers in kreisförmiger oder irgendwie gekrümmter Bahn, mag sie gleichförmig oder ungleichförmig sein, tritt eine Täuschung im Gebiete der Lageempfindungen ein: das Urteil über die Lage des Körpers zur Vertikalen wird gefälscht. Mach hat auch hierüber die ersten systematischen Beobachtungen gemacht, wozu er sich einen großen Apparat (Fig. 124) bauen ließ, der es ermöglichte, daß der Beobachter, in einem Kasten sitzend, gedreht wurde wie auf einem Karussell. Der Kasten mit dem Beobachter konnte längs eines Radius des (gedachten) Karussellbodens verschoben werden, bis die senkrechte Drehungsachse des ganzen Apparates durch ihn hindurchging. In diesem Falle wurde der Beobachter nur um seine eigene Längsachse gedreht, blieb aber an seinem Platze. Wurde der Kasten weiter hinausgeschoben, so durchlief der Beobachter eine kreisförmige Bahn. Der Kasten ließ sich so stellen, daß der Beobachter nach der Achse hinblickte oder in radialer oder tangentialer Richtung nach außen. Beim Blicken nach der Drehungsachse hin hat man nun den Eindruck, nach hintenüber (den Kopf von der Achse weg) geneigt zu sein. Ist die Bewegung eine gleichförmige, so ist diese Lagetäuschung vorhanden, ohne daß gleichzeitig Bewegungsempfindung vorhanden ist.

Fig. 124.



Machs Rotationsapparat zum Studium der Bewegungs- und Lageempfindungen.

Damit der Beobachter die Empfindung habe, vertikal zu stehen, muß er mit dem Kopfe der Achse zugeneigt sein, mit anderen Worten, der Körper

müßte statt in den wahren Vertikalen etwa in derjenigen Richtung orientiert sein, welche als Resultierende aus der Schwerkraft und der Centrifugalkraft aufzufassen ist. Je schneller die Drehung, desto mehr wird die Centrifugalkraft gegenüber der Schwerkraft überwiegen, desto mehr wird also die als vertikal empfundene Richtung von der wahren Vertikalen abweichen.

Delage hat beobachtet, daß man beim Schaukeln in einer gewöhnlichen Hängeschaukel die Schwingungsebene bei geschlossenen Augen nur dann richtig erkennt, wenn der Kopf vertikal steht. Bei Kopfneigung zur rechten Schulter erscheint die Schaukelebene stark nach links geneigt.

Man hat karussellartige Vorrichtungen gebaut, die aus einer großen, um eine vertikale Achse drehbaren Hohltrommel bestehen, in der sich zahlreiche Menschen aufhalten können. Der Boden ist nicht eben, sondern steigt zum Rande auf, wie bei den Radrennbahnen. Wie auf letzteren der Radfahrer bei seiner aktiven Fortbewegung sich in starker Neigung gegen die Vertikale, dagegen etwa senkrecht zu der schrägen Bodenfläche einstellt, so auch die Personen, die in jener Hohltrommel passiv rotiert werden. Man glaubt (bei geschlossenen Augen) in solchem Apparate vertikal zu stehen, wenn man in Wirklichkeit mit dem Kopfende stark gegen die Drehungsachse hin geneigt steht. Voraussetzung ist natürlich gleichförmige Bewegung und Wegfall von Gesichtsobjekten, die die wirkliche Vertikale erkennen lassen (letztere würden die Erscheinung bedeutend komplizieren).

Andeutungsweise kann man ähnliche Beobachtungen in jedem Eisenbahnzuge machen, der eine große Kurve durchfährt. Steht man mit geschlossenen Augen tatsächlich senkrecht, so glaubt man nach der konvexen Seite der Kurve geneigt zu sein.

2. Die Empfindung der Bewegung einzelner Körperteile.

Was oben über die Wahrnehmung der Lage (Stellung) beweglicher Körperteile im allgemeinen und der Extremitäten im speziellen gesagt wurde, läßt sich zum großen Teil auf die Wahrnehmung ihrer Bewegungen übertragen.

Aktive oder passive Bewegungen eines Körperteiles erzeugen im allgemeinen bestimmte Empfindungen, auf Grund deren man erkennt, 1. daß überhaupt Bewegung stattfindet, 2. welchen Betrag diese Bewegung erreicht, 3. in welcher Richtung sie erfolgt.

Die letzteren Wahrnehmungen haben natürlich eine von Fall zu Fall erheblich wechselnde Genauigkeit.

Auch die Deutlichkeit der Empfindung, die den Eintritt einer Bewegung ganz im allgemeinen anzeigt, wechselt übrigens je nach dem bewegten Körperteil, doch geht sie nicht parallel der Deutlichkeit der Lageempfindung, die wir von den einzelnen Teilen haben. Bewegungen der Zehen z. B. empfinden wir, wie mir scheint, nicht sehr viel weniger deutlich wie solche der Finger, wenngleich die Vorstellung von ihrer Gelenkstellung eine höchst unvollkommene ist (s. o. S. 743). Noch viel ausgeprägter ist der Unterschied bei der Zunge und den verschiedenen mimischen Bewegungsorganen. Es kommen hier eben zum Teil andere Gesichtspunkte in Betracht.

Vor allem spielen bei der Wahrnehmung derartiger Bewegungen die Hautempfindungen eine große Rolle, die bei der Lagewahrnehmung ganz zurück-

treten. Suchen wir uns klar zu machen, wonach wir bei geschlossenen Augen beurteilen, ob ein absolut ruhig gehaltenes Glied in Beugung oder Streckung liegt, so hilft uns die Hautempfindung dabei im allgemeinen nur, wenn es sich um extreme Lagen handelt, die zur Spannung der Haut auf der einen oder zur Faltenbildung auf der anderen Seite eines Gelenkes führen. Beides wird nur bei hohen Graden empfunden.

Anders bei Bewegung; bei manchen Bewegungen fühlt man deutlich, daß der Zustand der Haut irgendwie sich ändert. Ganz besonders merkbar werden die Hautempfindungen, wenn infolge der Bewegung eine Reibung der Haut etwa an Kleidungsstücken oder an anderen Körperteilen gefühlt wird. Auf diesem Umstande beruht es z. B., daß Bewegungen der Zunge so leicht erkannt werden, solange diese die übrigen schleimhautbekleideten Teile des Mundes berührt.

Wer „Innervationsempfindungen“ annimmt, wird jedenfalls voraussetzen müssen, daß diese bei den Bewegungen in ausgeprägterer Weise auftreten als bei ruhiger Haltung eines Körperteiles. Ich komme hierauf weiter unten zurück.

Sicher ist, daß neben den Hautempfindungen noch andere Empfindungen als Quelle der Wahrnehmung aktiver wie passiver Bewegungen in Betracht kommen. Das Gesamtgebiet dieser Empfindungen pflegt als Muskelsinn bezeichnet zu werden. Da aber selbst diejenigen Autoren, die diesen Ausdruck gebrauchen, größtenteils zugeben, daß die damit gemeinten Empfindungen nur zum Teil in sensiblen Muskelnerven, im übrigen aber in Sehnen und Gelenken ausgelöst werden, scheint mir die Verwendung der Bezeichnung Muskelsinn nicht sonderlich zweckmäßig. Immerhin ist eine solche Benennung noch sachgemäßer als die Einbeziehung der Bewegungsempfindungen in den „Tastsinn“ oder in die „Gemeingefühle“.

Daß die aktiven Bewegungen außer durch den Gesichtssinn auch durch lokal in den bewegten Teilen entstehende Empfindungen gefühlt und mit ihrer Hilfe reguliert werden, ist eine alte Lehre, der Ch. Bell zuerst Anerkennung verschaffte. Jetzt ist sie allgemein angenommen. Daran zum mindesten zweifelt wohl niemand, daß die Bewegungen der einzelnen Körperteile durch centripetale Innervationen fortwährend geregelt werden. Exner [1]) hat die Abhängigkeit der motorischen Innervation von den sensiblen Nerven durch die meines Erachtens nicht besonders glücklich gewählte Bezeichnung „Sensomobilität“ festzulegen gesucht. Exner ging bei seinen Betrachtungen von der Erfahrung aus, daß namentlich in solchen Organen, in denen fein abgestufte Muskelkontraktionen eine wichtige Rolle spielen, wie z. B. im Kehlkopf, Ausschaltung der centripetalen Nervenbahn bei intakten centrifugalen Nerven schwere Funktionsstörung machen kann. Analoges beobachtet man ja nun auch an den Extremitäten, vor allem an den Händen, deren feiner abgestufte Bewegungen durch Ausfall der Sensibilität ebenfalls vernichtet werden. Der oben erwähnte, von Strümpell beobachte Fall, in welchem die sensible Innervation des einen Armes durch eine Rückenmarksverletzung aufgehoben war, dient auch hierfür wieder als deutlichste Bestätigung. Während der Patient wohl imstande war, mit der betreffenden Hand einen kräftigen Druck auszuüben und unter Kontrolle der Augen den

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. 48 (1891).

Fingern jede beliebige Stellung zu geben, fehlte ihm bei geschlossenen Augen durchaus die Fähigkeit, irgendwie feiner abgestufte Fingerbewegungen auszuführen, die Finger in bestimmter Reihenfolge zu heben usw. Die vom Willen beeinflußbare motorische Leitungsbahn war hier zweifellos intakt, auch konnten die einzelnen Muskelgruppen isoliert in Tätigkeit gesetzt werden, zum Zweck der Erzielung bestimmter Stellungen, jedoch nur unter der Regulierung durch den Gesichtssinn, dessen der Gesunde zu gleichem Zwecke nicht bedarf.

Sherrington und Mott [1]) fanden bei Affen beträchtliche Bewegungsstörungen nach Durchschneidung der sensiblen Rückenmarkswurzeln für die betreffenden Extremitäten. H. Munk [2]) beschreibt die Störungen als wesentlich geringer und auch qualitativ abweichend von genannten Autoren. Näher auf diese Frage wie auch auf die einschlägigen Arbeiten H. E. Herings einzugehen ist hier nicht der Ort.

Messende Versuche über die Schwellenwerte der Bewegungsempfindungen an den Extremitäten hat Goldscheider [3]) ausgeführt; er stellte erstens den Schwellenwert der Winkelbewegung fest, die in einem Gelenk (passiv) ausgeführt werden muß, damit ohne Kontrolle des Gesichtssinnes eben die Bewegung als solche erkannt wird. Zweitens mußte aber auch die Geschwindigkeit berücksichtigt werden, da der Schwellenwert verschieden gefunden wird je nach der Geschwindigkeit der Bewegung, und zwar niedriger mit steigender Geschwindigkeit.

In der folgenden Tabelle sind nach Goldscheider die für einige seiner Gelenke geltenden Schwellenwerte der Bewegung und der Geschwindigkeit angegeben. Die Schwellenwerte der merkbaren Gelenkbeugung sind nach dem oben Gesagten im allgemeinen nur für eine bestimmte Geschwindigkeit gültig, die ich in der Tabelle nicht angebe. Übrigens ändert sich die Schwelle mit mäßigen Geschwindigkeitsänderungen nicht erheblich.

Im dritten Stabe der Tabelle sind noch die für die Praxis der Sensibilitätsprüfung wichtigeren sicher merklichen Werte der Gelenkbewegung angegeben.

Gelenke	Schwelle der Exkursion Grad	Schwelle d. Geschwindigkeit Grad pro Sek.	Sicher merkliche Werte d. Exkursion Grad
Zweites Interphalangealgelenk } Zeigefinger	1,03 — 1,26	—	1,1 — 1,8
Erstes „ } Zeigefinger	0,72 — 1,05	—	0,7 — 1,5
Metacarpo-Phalangealgelenk } Zeigefinger	0,34 — 0,43	—	0,4 — 0,5
Handgelenk	0,26 — 0,42	—	0,3 — 0,6
Ellenbogengelenk	0,40 — 0,61	0,47 — 0,6	0,5 — 0,8
Schultergelenk	0,22 — 0,42	0,3 — 0,35	0,3 — 0,6
Hüftgelenk	0,50 — 0,79	0,25 — 0,6	0,5 — 1,0
Kniegelenk	0,50 — 0,70	0,44 — 0,62	0,5 — 1,0
Fußgelenk	1,15 — 1,30	0,76 — 1,4	1,3 — 1,6

[1]) Proc. R. Soc. London **57**, 1895. — [2]) Sitzungsber. Berliner Akad. d. Wiss. **48**, 1903. — [3]) Zentralbl. f. Physiol. 1887 u. Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1889. Auch in den „Gesammelten Abhandlungen“ **2** (1898).

Das Schultergelenk bedarf nicht nur der relativ geringsten Winkeldrehung, sondern auch der geringsten Geschwindigkeit, um Bewegungen erkennen zu lassen; die Sensibilität des Fußgelenkes dagegen zeigt sich in beiden Beziehungen am stumpfsten.

Für klinische Prüfung der Gelenksensibilität hat Goldscheider einen Bewegungsmesser[1]) angegeben, mit dem diese Prüfung an den meisten Gelenken ausführbar ist.

Bei aktiv ausgeführten Bewegungen liegt der Schwellenwert im allgemeinen noch etwas niedriger als bei den passiven.

Abstumpfung der Hautsensibilität durch kräftige Faradisierung setzt die Empfindlichkeit für Bewegung wenig, Querdurchströmung eines Gelenkes dagegen (ebenfalls mit faradischem Strome) merklich herab (Goldscheider).

Bei Blinden, welche die Blindenschrift geläufig lesen, scheint es nach den Untersuchungen von Hocheisen[2]) besonders die Verfeinerung der Bewegungsempfindungen zu sein, infolge deren diese Personen imstande sind, den Zügen der Reliefschrift zu folgen. Der sog. Ortssinn der Haut kommt hierfür weit weniger in Betracht. Die Verfeinerung der Bewegungsempfindungen der Blinden konnte Hocheisen mittels des Goldscheiderschen Bewegungsmessers direkt nachweisen. Kinder zeigten sich den Erwachsenen in dieser Hinsicht überlegen, und zwar auch die sehenden.

Über den Ort der Auslösung der hier besprochenen Bewegungsempfindungen an den Extremitätengelenken, sowie über ihre Beziehungen zu den Empfindungen der Gliederlage vgl. Kapitel IV.

Versuche über die Größenschätzung bei aktiv oder passiv ausgeführten Bewegungen sind sehr vielfach ausgeführt worden. Dabei wurde häufig eine störende Komplikation dadurch in den Versuch gebracht, daß nicht der Umfang einfacher Beugung und Streckung in einem bestimmten Gelenk als zu beurteilende Größe gewählt wurde, sondern geradlinige Bewegungen, die stets eine mehr oder weniger komplizierte Benutzung mehrerer Gelenke voraussetzen[3]). Derartige Versuchsanordnungen sind unter anderen von Delabarre[4]), Cremer[5]), Bloch[6]), Falk[7]), Fullerton und Cattel[8]), Woodworth[9]) beschrieben worden.

Einer Vorrichtung mit rein radiusförmiger Bewegung des gebeugten Unterarmes (Drehung im Schultergelenk) bediente sich ganz neuerdings Angier (noch nicht veröffentlichte Untersuchung).

Die Untersuchungen, die von den genannten Autoren ausgeführt wurden, bezweckten in der Hauptsache Messungen der Genauigkeit, mit der zwei Strecken bloß mit Hilfe der Bewegungsempfindungen ihrer Größe nach verglichen werden können. Jastrow[10]) hat gezeigt (was von vornherein wahr-

[1]) Berliner klin. Wochenschr. 1900. — [2]) Der Muskelsinn Blinder. Inaug.-Diss. Berlin 1892. — [3]) Hierauf hat schon Külpe (Grundriß der Psychologie 1893, S. 354) aufmerksam gemacht. — [4]) Über Bewegungsempfindungen. Inaug.-Diss. Freiburg i. Br. 1891. — [5]) Über das Schätzen von Distanzen bei Bewegung von Arm und Hand. Inaug.-Diss. Würzburg 1887. — [6]) Rev. scientif. **45**, 294—301, 1890. — [7]) Versuche über die Raumschätzung mit Hilfe von Armbewegungen. Inaug.-Diss. Dorpat 1890. — [8]) On the perception of small differences etc. Univ. of Pennsylvania, Philosoph. Series **2** (1892). — [9]) Psychol. Review. Monograph. Suppl. Nr. 13, 1899. — [10]) Mind **11**, 539—554, 1886.

scheinlich war), daß eine solche Vergleichung wesentlich ungenauer ist wie eine mit Hilfe des Gesichtssinnes ausgeführte. Den entsprechenden Nachweis für die Empfindung der Gliederlage führten Bowditch und Southard[1]). Den erheblichen Einfluß der Übung bei solchen Versuchen demonstrierten besonders Kramer und Moskiewicz[2]).

Mehrfach sind auch die Bewegungsempfindungen der beiden Körperseiten miteinander verglichen worden, wobei sich das Hauptinteresse auf gleichzeitig ausgeführte symmetrische Bewegungen mit beiden Händen konzentrierte. Die Bevorzugung des rechten Armes bei vielen Beschäftigungen konnte nicht wohl ohne Einfluß auf die relative Feinheit der Bewegungsempfindungen bleiben. Untersuchungen in dieser Richtung sind von Cremer[3]), Delabarre[4]), Hall und Hartwell[5]), Loeb[6]), Ostermann[7]) und anderen ausgeführt worden. Als bemerkenswertes Ergebnis ist zu verzeichnen, daß Rechtshänder im allgemeinen, wenn sie mit beiden Händen gleich große Bewegungen machen wollen, die Bewegung mit dem linken Arm größer machen; nur solche Leute, die viel Handarbeiten verrichten, pflegen sich umgekehrt zu verhalten, sie unterschätzen also im Gegensatz zu den übrigen Personen die Bewegungen des rechten Armes.

III. Die Widerstandsempfindungen.

Widerstand, der sich den aktiven Bewegungen entgegensetzt, wird bekanntlich wahrgenommen und kann graduell taxiert werden. Drückt man mit einem Finger auf einen elastischen Gummiball, so hat man im ersten Moment die Berührungsempfindung, deren Intensität bei weiterem Drücken zunimmt. Führt man den Druck schnell aus, so tritt zugleich ausgeprägte Bewegungsempfindung auf, wie bei jeder ähnlichen Fingerbewegung. Dazu tritt aber als dritte Empfindungsqualität, trennbar von der Berührungs- und der Bewegungsempfindung, die Widerstandsempfindung.

Auch beim Drücken auf einen festen, nicht merklich elastischen Körper entsteht Widerstandsempfindung, in diesem Falle ohne Bewegungsempfindung. Die Stärke der Widerstandsempfindung beim Druck auf einen Körper bestimmt unser Urteil über dessen „Konsistenz".

An und für sich könnte man annehmen, dieses Urteil wäre schon durch die Berührungs- und Bewegungsempfindung ermöglicht, da man beim Druck auf einen starren Körper steigende Druckempfindung, aber keine Bewegungsempfindung hat, während beim Druck auf einen nachgiebigen Körper die Bewegungsempfindung hinzukommt. Es gäbe, wenn diese Auffassung das Richtige träfe, keine eigentliche einfache Empfindung, sondern nur eine zusammengesetzte Wahrnehmung des Widerstandes. Es ist indessen leicht festzustellen, daß die tatsächliche Sachlage anders ist.

Zunächst erkennt man beim Drücken auf einen Widerstand leistenden Körper deutlich, daß außer an der Berührungsstelle noch in anderen Teilen der drückenden Extremität lokalisierte Empfindungen den Gesamteindruck

[1]) Journ. of Physiol. 3, 232, 1881. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 25, 101, 1901. — [3]) l. c. — [4]) l. c. — [5]) Mind 9, 93, 1884. — [6]) Arch. f. d. ges. Physiol. 41, 114, 1887. — [7]) Die Symmetrie im Fühlraum der Hand. Inaug.-Diss. Würzburg 1888.

charakterisieren, um so deutlicher, je stärker man drückt und je größer der Widerstand ist. Ganz vorzugsweise sind es die Gelenkstellen, auf die diese Empfindungen lokalisiert werden; bei stärkerem Druck kommen noch unbestimmte Empfindungen in der Gegend der tätigen Muskeln und Sehnen hinzu, Empfindungen, die bis ins Schmerzhafte gehen können. Daß die Gesamtheit dieser Eindrücke ohne notwendige Beteiligung von Hautempfindungen als Widerstandsempfindung zum Bewußtsein gelangen kann, geht noch besonders daraus hervor, daß auch, wenn die von der Berührung betroffene Haut anästhetisch gemacht worden ist, die Widerstandsempfindung nicht ausbleibt, wie es auch gleichgültig ist, ob der unvermeidliche Druck auf die Haut eng lokalisiert ist oder durch Übertragung der Druck- und Zugwirkung auf große Flächen (wassergefüllte Gummimanschetten) verteilt wird (Goldscheider). Näheres über diese Frage siehe im folgenden Kapitel, wo auch zweckmäßigererweise die Erfahrungen über Schwellenwerte der Widerstandsempfindung und ihre Differenzen in verschiedenen Gelenken zur Erörterung kommen.

Als „paradoxe Widerstandsempfindung“ bezeichnet Goldscheider folgende von ihm entdeckte, leicht zu bestätigende Erscheinung. Man hält in der Hand einen Faden, an den unten ein nicht zu leichtes Gewicht gebunden ist. Wenn bei Senkung der Hand mit dem Faden das Gewicht den Boden berührt, fühlt man einen deutlichen Widerstand, wie wenn man statt des Fadens mit einem festen Stab den Boden berührte. Die Empfindung wird wie bei dem bekannten Weberschen Stäbchenversuch nach außen projiziert, an die Stelle, wo das Gewicht den Boden berührt. Bei fortgesetzter Senkung des Armes, der hierbei völlig vom Zuge des Gewichtes entlastet wird, fühlt man einen federnden Widerstand, der plötzlich nachläßt, ganz ähnlich, wie wenn man eine verbogene Blechplatte von der konvexen Seite her durchdrückt, bis sie plötzlich nachgibt und sich durchbiegt.

Drückt man einen elastischen Stab, der mit seinem unteren Ende auf dem Fußboden aufsteht, vom anderen Ende her mit der Hand zusammen, so empfindet man natürlich Widerstand gegen die Durchbiegung; wechselt man nun durch Heben und Senken der Hand zwischen verschiedenen Graden der Durchbiegung des Stabes, so hat man nicht nur beim Niederdrücken, wobei man gegen den elastischen Widerstand des Stabes arbeitet, sondern auch beim Nachlaß im Druck das Gefühl eines deutlichen Widerstandes.

Der Goldscheidersche Versuch, dessen nahe Beziehungen zu dem letzterwähnten auf der Hand liegen, wird von dem Autor dadurch erklärt, daß die das Objekt haltenden Finger durch Muskelspannung äquilibriert sind, welch letztere bei der Entlastung noch fortdauert. Infolgedessen treffen die in Bewegung begriffenen Finger im Moment der Entlastung auf einen Widerstand von der Größe der Muskelspannung, d. h. des bis dahin wirkenden Gewichtes.

Bei dem Versuch mit dem elastischen Stabe sind die Bedingungen ganz ähnliche, nur tritt an die Stelle der Entlastung durch Aufstoßen des Gewichtes auf die Unterlage die Entspannung durch Hebung der Hand vermittelst der Oberarmmuskeln. Man fühlt also abwechselnd den Widerstand des elastischen Stabes und der elastischen Muskeln in ihrem Spannungszustande.

Die Erscheinung der paradoxen Widerstandsempfindung diente Goldscheider und Blecher[1]) dazu, den Schwellenwert der Widerstandsempfindung für verschiedene Gelenke vergleichend zu bestimmen. An den einzelnen Phalangen der Finger, an der Hand oder am Arme wurden mit Hilfe eines Bandes (und breiter, wassergefüllter Gummimanschette, die den Druck verteilt) verschiedene Gewichte angehängt und festgestellt, wie groß das Gewicht sein muß, damit bei seinem Aufsetzen auf feste Unterlage (also bei Entlastung der Extremität von dem Zug des Gewichts) eben noch die erwähnte stoßähnliche Widerstandsempfindung auftritt. Durchgehends sinkt der Schwellenwert, je weiter nach der Peripherie (Fingerspitze) hin der Aufhängungspunkt gelegt wird. Als Beispiel sei eine Versuchsreihe angeführt, bei der die Senkung des belasteten Armes im Schultergelenk erfolgte. Das kleinste Gewicht, bei welchem noch Widerstandsempfindung auftrat, betrug 8,1 g, wenn es an der Endphalanx, 11,0 g, wenn es an der zweiten Phalanx, 15,1 g, wenn es an der ersten Phalanx des Zeigefingers, 25,3 g, wenn es an der Hand, etwa 50 g, wenn es am Unterarm, 77,4 g, wenn es am Oberarm hing. Wurde der wirksame Druck auf eine kleine Hautpartie beschränkt, so konnten Goldscheider und Blecher neben der Widerstandsempfindung noch die lokale Empfindung einer Druckabnahme in der Haut konstatieren, eine Empfindung, deren Schwellenwert merklich in die Höhe ging, wenn die betreffende Hautpartie durch lokale Kokaininjektion anästhesiert war.

Die Empfindung der Schwere ist der Empfindung des Widerstandes nahe verwandt, ja sie ist in gewissem Sinne nur ein Spezialfall jener. Hebt man den horizontal ausgestreckten Arm, an dem ein Band mit angehängtem Gewicht befestigt ist, in die Höhe, so ist, wie kaum zu bezweifeln sein wird, unter geeigneten Umständen die Empfindung dieselbe, wie wenn an dem nicht durch Gewicht beschwerten Bande irgend eine Bremsvorrichtung angebracht ist. Ob es möglich ist, diesen Versuch so auszuführen, daß die Versuchsperson tatsächlich außerstande ist, den Widerstand des Gewichts und der Bremsvorrichtung zu unterscheiden, kann bezweifelt werden; indessen zeigt schon ein einfacher Orientierungsversuch, daß die resultierenden Empfindungen tatsächlich qualitativ gleichartig sind. Zu bedenken ist natürlich, daß die Geschwindigkeit, mit der die Armhebung ausgeführt wird, in den beiden Fällen in ganz verschiedenem Maße in Betracht kommt.

Hält man mit ausgestrecktem Arm ein Gewicht, so ist natürlich die Wirkung genau dieselbe, wie wenn eine andere äquivalente Kraft in gleicher Weise an der gleichen Stelle ziehend wirkt. Die Empfindung der Schwere als solche existiert nicht, die „Schwere“ ist eine Abstraktion auf Grund von Empfindungen des Druckes und des Widerstandes, und der Begriff der Schwere ist für unsere Vorstellung unlösbar von der Vorstellung eines lastenden Gegenstandes; bei der Widerstandsempfindung ist die Bezugnahme auf den widerstandleistenden Gegenstand eine weit weniger zwingende. Die ganze Beurteilung des Wesens der Schwere und der quantitativen Schwereschätzung fällt somit mehr in das Gebiet der Psychologie als der Physiologie. Ich beschränke mich daher auch hier auf wenige kurze Bemerkungen über diesen Gegenstand.

E. H. Weber[2]) hat gefunden, daß Unterscheidung der Schwere zweier Gewichte mit merklich größerer Sicherheit und Genauigkeit erfolgt, wenn die Gewichte von der Versuchsperson gehoben werden, als wenn sie ihr von einer anderen Person auf eine bestimmte Hautstelle aufgelegt werden. Weber

[1]) Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1893 u. Goldscheider, Ges. Abhandl. 2, 309. — [2]) Artikel: Tastsinn und Gemeingefühl in Wagners Handwörterbuch der Physiol. 3 (2), 547, 1846.

fand im ersteren Falle noch Gewichte unterscheidbar, die sich wie 39 : 40 verhielten, im zweiten Falle, also bei bloßer Beurteilung des Druckes auf der Haut, war bei dem Verhältnis 29 : 30 die Unterscheidung nur noch eben möglich.

Bekanntlich ist die Schwereempfindung besonders geeignet, um an ihr das sog. Webersche Gesetz über die Unterschiedsschwellen bei verschiedenen absoluten Reizgrößen zu demonstrieren.

Nach G. E. Müller und Schumann [1]) wird bei der vergleichenden Hebung zweier unbekannter Gewichte im allgemeinen beide Male derselbe motorische Impuls erteilt, und das Urteil über das Schwereverhältnis der Gewichte auf Grund der Geschwindigkeiten der eintretenden Bewegung gefällt. Dieselben Autoren haben die Bedingungen der Schwereschätzung nach den verschiedensten Richtungen untersucht, in ähnlicher Weise, doch mit zum Teil abweichendem Resultat Fullerton und Cattel [2]). Auf diese Untersuchungen kann hier nicht näher eingegangen werden. Einige wichtige Tatsachen, die hierher gehören, finden weiter unten bei der Diskussion über die Auslösungsstellen der Widerstandsempfindungen ihre Erwähnung.

IV. Theoretisches über die Bewegungs- und Lageempfindungen nicht-labyrinthären Ursprungs, sowie über die Widerstandsempfindungen.

In dem Gesamtgebiet der in den vorhergehenden Kapiteln besprochenen Bewegungs- und Lageempfindungen ergibt sich als eine naheliegende Teilung die folgende: Ein Teil dieser Empfindungen bezieht sich auf Lagen und Bewegungen unseres Körpers als eines Ganzen, wobei die gegenseitige Stellung der beweglichen Körperteile zueinander außer Betracht bleibt; die zweite Gruppe von Empfindungen unterrichtet uns anderseits gerade darüber, wie die einzelnen Körperteile zueinander stehen, und ob in den Gelenken Ruhe- oder Bewegungszustand herrscht. Nach der Auffassung mancher Autoren entspricht dieser Teilung nach dem Wahrnehmungsinhalt eine Sonderung nach den percipierenden Sinnesorganen, es werden die Wahrnehmungen der ersten Kategorie mittels des Labyrinths, die der zweiten mittels der Gelenknerven gemacht.

Wenn diese Annahme auch in der Hauptsache gewiß zutreffend ist, so bedarf sie doch meines Erachtens der Ergänzung, daß ein erheblicher Teil von den Empfindungen der Lage und Bewegung des Gesamtkörpers nicht-labyrinthären Ursprungs ist. Auf solche Empfindungen, die zu der eigentlichen Lageempfindung als sekundäre Begleiterscheinungen hinzutreten, wurde schon oben hingewiesen, und schon hier möge erwähnt werden, daß auch bei den Empfindungen der Bewegung des ganzen Körpers, namentlich den Progressivbewegungen, solche Begleiterscheinungen nicht fehlen. Delage hält sogar diffuse Empfindungen in den inneren Organen, Eingeweiden usw. für die eigentliche Quelle der Empfindung von Progressivbewegung.

Daß bei plötzlichen Ungleichförmigkeiten in der horizontalen oder vertikalen Progressivbewegung besondere Empfindungen im Unterleib auftreten,

---

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **45**, 56, 1889. — [2]) On the Perception of small Differences etc. Univ. of Pennsylvania, Philosophical Ser. 2 (1892).

ist zweifellos. Da eine genauere Analyse dieser Sensationen einstweilen noch fehlt und auch schwer durchführbar sein dürfte, da ferner über ihren Anteil an der Bewegungswahrnehmung nichts Bestimmtes hat ermittelt werden können, begnüge ich mich mit diesem kurzen Hinweis auf sie.

Die Funktionen des nach dem Vorgang von Ch. Bell so genannten, vielumstrittenen Muskelsinnes zerfallen in drei Gruppen: die Empfindungen der Lage, die Empfindungen der Bewegung der beweglichen Körperteile und die Empfindungen des Widerstandes bei Ausführung von Bewegungen oder bei dem Bestreben, bestimmte Lagen einzuhalten.

Um die Erforschung und gegenseitige Abgrenzung dieser drei Teilfunktionen des Muskelsinnes hat sich in erfolgreichster Weise A. Goldscheider bemüht, dessen Auffassung ich mich auch in den wesentlichsten Punkten anschließe.

Wie schon oben gelegentlich bemerkt wurde, können die Empfindungen der Bewegung und der Lage von Extremitäten nicht aus Hautempfindungen, speziell also Empfindungen des Druckes oder der Spannung im Gebiete der Hautnerven abgeleitet werden, wie Schiff[1]) versucht hat. Diese Sensationen wirken dabei höchstens in ganz untergeordneter Rolle als Begleiterscheinungen mit und können nur in speziellen (oben erwähnten) Fällen einen erheblicheren Anteil wenigstens an der Bewegungs- und Widerstandsempfindung haben. Während hierüber nur einerlei Meinung herrschen dürfte, besteht oder bestand Meinungsverschiedenheit darüber, ob die Bewegungs- und Widerstandsempfindung auf centripetalen Erregungen anderer Herkunft (von Muskel-, Sehnen-, Gelenknerven) beruhen oder auf sog. Innervationsgefühlen, d. h. auf dem Bewußtwerden des centrifugalen Innervationsstromes in den motorischen Bahnen[2]).

Es hat sich gezeigt, daß man der Annahme solcher Innervationsgefühle nicht bedarf, um die hier in Rede stehenden Tatsachen zu erklären, und es darf als sehr fraglich bezeichnet werden, ob ihre Existenz sich irgendwie wird nachweisen lassen. Am wichtigsten für die Frage nach der Existenz von Innervationsempfindungen sind Fälle von rein sensibler Lähmung einer Extremität, wie sie unter anderen von Strümpell beschrieben sind; vgl. hierzu den oben zitierten Fall[3]) und besonders auch einen älteren Fall[4]); dieser betraf einen Knaben, bei dem von den Sinnesorganen nur ein Auge und ein Ohr funktionsfähig waren. Trotz intakter motorischer Innervierung konnte der Patient ohne Zuhilfenahme des Gesichtssinnes nicht einzelne Muskelgruppen bewegen, z. B. nicht einen einzelnen Finger beugen. Später, als die Sensibilität sich besserte, konnte er bei geschlossenen Augen einen Finger isoliert bewegen, vorausgesetzt, daß die Hand auf fester Unterlage lag und ihm so die Möglichkeit gegeben war, die Finger gleichzeitig oder nacheinander fest auf die Unterlage aufzudrücken und sich so durch die sensiblen Reize den betreffenden Finger, den er bewegen sollte, gewissermaßen herauszusuchen.

Auch die Empfindungen des Widerstandes und der Schwere leiden bei sensibler Lähmung und erhaltener motorischer Innervation beträchtlich. So

[1]) Lehrb. d. Physiol. **1**, 156, Lahr 1858 bis 1859. — [2]) Für die Innervationsgefühle ist namentlich Wundt eingetreten (Grundz. d. physiol. Psychol.). — [3]) Deutsche Zeitschr. f. Nervenheilk. **23** (1902). — [4]) Deutsches Arch. f. klin. Med. **22** (1878).

beschreiben Gley und Marillier[1]) einen derartigen Fall, in welchem infolge von Anästhesie der oberen Körperhälfte die Gewichtsschätzung für Gegenstände fehlte, die mit dem Arm hochgehalten wurden. Auch die plötzliche Entlastung wurde nicht gefühlt. Ein ähnlicher interessanter Fall ist von Landry[2]) beschrieben.

Die klinische Literatur enthält noch zahlreiche ähnliche Fälle, die hier nicht erwähnt werden können.

Gegen die Zurückführung der Widerstandsempfindung beim Gewichtheben auf Innervationsgefühle spricht übrigens sehr entschieden der von Bernhardt[3]) beschriebene und von Goldscheider bestätigte folgende Versuch: Man hat die Empfindung der Schwere beim Heben eines an der Extremität befestigten Gewichtes nicht nur dann, wenn die Hebung durch willkürliche Muskelkontraktion bewirkt wird, sondern auch, wenn die Kontraktion durch elektrischen Reiz ausgelöst wird. Sogar die Unterschiedsempfindlichkeit ist bei den auf elektrischen Reiz ausgeführten Gewichthebungen nicht nennenswert geringer als bei den willkürlichen.

Eine weitere Tatsache, die speziell gegen die Heranziehung von Innervationsempfindungen zur Erklärung der Wahrnehmung der Lage und Haltung eines Gliedes spricht, hat Goldscheider aufgedeckt: Kräftige Faradisation eines Fingergliedes hebt die Empfindung der Haltung dieses Fingers fast völlig auf, obgleich die bei Fingerbewegung beteiligten motorischen Nerven und Muskeln hierbei ganz unaffiziert bleiben. Auch die oben beschriebene Erscheinung der „paradoxen Widerstandsempfindung“ (Goldscheider) führt keineswegs auf die Annahme von Innervationsempfindungen, sondern auf peripherisch entstehende Widerstandsempfindungen.

Ein für die Existenz von Innervationsempfindungen zuweilen angeführtes Argument ist folgendes: Wenn die Ausführung einer intendierten Bewegung passiv gehindert wird[4]) oder infolge Lähmung der Muskeln unmöglich ist, soll doch „Bewegung empfunden“ werden. Das ist, wie leicht ersichtlich, eine Verwechslung von Bewegungsempfindung und Bewegungsvorstellung.

Man hat, wie es ja schon der Name „Muskelsinn“ zum Ausdruck bringt, die tiefe, nicht in die Hautsinnesorgane zu lokalisierende Sensibilität zunächst vorwiegend oder gar ausschließlich auf die centripetalen Muskelnerven bezogen, ausgehend hauptsächlich von der Tatsache, daß die Muskeln schmerzen können und auch bei starker Ermüdung gewisse in die Muskeln lokalisierte Sensationen auftreten. Inwieweit solche Muskelempfindungen tatsächlich bestehen und welches ihre physiologische Bedeutung ist, soll hier nicht erörtert werden. Außer Zweifel dürfte es stehen, daß sie hinsichtlich der Vermittelung der Bewegungs- und Lageempfindungen, sowie der Wider-

---

[1]) Revue philosoph. 1887, p. 411. — [2]) Gaz. des hôpiteaux. 1855, Obs. III (zitiert nach Goldscheider). — [3]) Arch. f. Psychiatrie 1872, S. 618. — [4]) Vgl. Sternberg, Arch. f. d. ges. Physiol. 37, 1, 1885. Betreffs näherer Diskussion dieser und ähnlicher Erfahrungen aus der Theorie der Innervationsempfindungen überhaupt vgl.: Müller und Schumann (l. c.), Woodworth (l. c.), Goldscheider (l. c.), W. Wundt, Grundz. d. physiol. Psychol., sowie L. Kerschner, Zur Theorie der Innervationsgefühle. Ber. d. naturw.-med. Vereins Innsbruck 23 (1896/97), wo auch die ältere Literatur gesammelt ist.

standsempfindungen hinter den Gelenkempfindungen[1]) weit zurückstehen.

Die Bewegungsempfindungen sind zwar nicht so scharf lokalisiert wie die Druckempfindungen in der Haut, aber immerhin bestimmt genug, um erkennen zu lassen, daß man sie in die Gegend der Gelenke verlegt, nicht in die Gegend, wo die Muskeln liegen. Deutlich markiert sich dieser Unterschied natürlich da, wo Muskeln und durch sie bewegte Teile weit auseinander liegen, wie bei den Fingern. In der Tat hat man Empfindung in der Gegend, wo z. B. die Fingerbeugemuskeln liegen, nur bei krampfhaft starker Zusammenziehung dieser Muskeln, während man bei schwachen Kontraktionen ausschließlich die Empfindung in den Fingern lokalisiert. Das Goldscheidersche Verfahren der Erzeugung von Hypästhesie in den Gelenken durch faradische Durchströmung bewirkt, wie schon oben erwähnt wurde, eine bedeutende Abstumpfung der Bewegungsempfindung, während sie die sensiblen Muskelnerven in keiner Weise beeinflussen kann.

Ob und inwieweit die Gelenksensibilität durch die Sensibilität der Muskeln, Sehnen und Fascien bei der Vermittelung der Bewegungsempfindungen unterstützt wird, scheint mir nach den vorliegenden Tatsachen schwer festzustellen. Die Argumentationen Goldscheiders, die bestimmt sind, die Muskelnerven als gänzlich irrelevant für die Bewegungsempfindung zu erweisen (vor allem die Kleinheit der wahrnehmbaren Gelenkexkursionen hebt Goldscheider als wichtig hervor), scheinen mir nicht ganz zwingend. Daß die Zunge, ein sehr mobiles Organ ohne Gelenke, auffallend undeutliche Bewegungs- und Lageempfindungen ergibt, ist zweifellos richtig und wurde auch schon oben bemerkt; noch unvollkommener scheinen mir die Widerstandsempfindungen der Zunge zu sein. Aber das beweist nicht allzu viel, denn erstens ist die Zunge ein Organ, von dem man sich kaum vorstellen kann, daß die Empfindungen der mit ihm ausgeführten Bewegungen sonderlichen biologischen Wert haben, und zweitens muß bedacht werden, daß die entsprechenden Empfindungen im Kehlkopf mit seinen komplizierten Gelenken noch weniger ausgebildet sind. Beide Organe, Zunge wie Kehlkopf, müssen für die Sprachfunktion in feinst abgestuften Bewegungen verwendet werden. Aber diese Bewegungen beherrschen wir nicht bewußtermaßen, und wir bedürfen ihrer Kenntnis nicht.

Ich schließe aus dem Gesagten, daß die Stumpfheit der in der Zunge auslösbaren Bewegungsempfindungen nichts für die ausschließliche Lokalisation der Bewegungsempfindungen in den Gelenken beweist. Darin jedoch wird Goldscheider gewiß recht haben, daß die Gelenksensationen bei weitem die wichtigsten sind. Das bedeutungsvollste Argument für die Auffassung liegt in den schon erwähnten Goldscheiderschen Faradisationsversuchen: Kräftige Faradisation eines Gelenkes erhöht den Schwellenwert der merkbaren passiven Gelenkbiegung deutlich und setzt die Deutlichkeit der Lageempfindung bis zum fast völligen Schwinden herab. Da die Erzeugung von Hypästhesie durch Faradisierung eine nichts weniger als ideale Methode ist, wäre der Versuch, mit anderen Mitteln die Gelenke zu anästhesieren und Schwellen-

[1]) Auf die Bedeutung der Gelenksensibilität haben besonders Lewinski, Virchows Arch. 77 (1879) und Goldscheider (l. c.) hingewiesen.

bestimmungen, ähnlich den Goldscheiderschen, auszuführen, wohl recht lohnend.

Über die Art, wie die Bewegungsempfindungen in den Gelenken ausgelöst werden, wissen wir ebensowenig wie über den genaueren Ort der dabei tätigen Endorgane. Mit großer Wahrscheinlichkeit kann nur behauptet werden, daß es die Nerven der Gelenkkapseln sind, die hierbei in Betracht kommen. Noch weniger Bestimmtes weiß man über die Organe der Widerstandsempfindungen; Goldscheider nimmt, wie ich glaube mit vollem Recht, an, sie müssen von den Organen der Bewegungsempfindung getrennt sein, da die Bedingungen ihrer Tätigkeit wesentlich andere sind. Vor allem kann die Empfindung des Widerstandes eintreten, ohne daß eine merkliche Winkeldrehung im Gelenk dabei nötig wäre.

Goldscheider hat sich bemüht, in Tierversuchen festzustellen, ob die Gelenkenden empfindlich sind. Das Ergebnis war für die mit Knorpel überzogenen Partien negativ, positiv dagegen für das knöcherne Gelenkende bis nahe an die Knorpelgrenze. Die Versuche erscheinen übrigens mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, weil als Reagens auf die stattfindende sensible Reizung (Druck, Hitze) die Atmung diente und aus einer Modifikation der regulären Atmungskurven auf erfolgreiche Reizung vom Gelenk geschlossen wurde.

Als Perceptionsstelle der Schwereempfindungen vermutet Goldscheider die Sehnen, deren Spannung empfunden wird, als Perceptionsstelle der Widerstandsempfindungen die Gelenke, die mehr oder weniger stark gedrückt werden. Dazu tritt noch die Hautsensibilität, die einen allerdings nicht bedeutenden Anteil an der Empfindung des Widerstandes zu haben scheint. Daß Schwere- und Widerstandsempfindung qualitativ verschieden seien, schließt Goldscheider aus dem oben erwähnten Versuch der „paradoxen Widerstandsempfindung". Wenn die beiden Empfindungen sich qualitativ glichen, so müßte sich, meint Goldscheider, in dem Moment, wo man das am Faden gehaltene Gewicht auf den Boden aufsetzt, eine Steigerung der bis dahin vorhandenen Empfindung bemerkbar machen, während in Wirklichkeit die Schwereempfindung aufhöre und der Widerstandsempfindung Platz mache. Ich kann diese Überlegung nicht ausschlaggebend finden, um daraufhin die Schwereempfindung und Widerstandsempfindung für spezifisch verschiedene Empfindungsqualitäten zu erklären. Näheres Eingehen auf diese Frage ist hier ausgeschlossen.

V. Der Schwindel und die Drehungsreflexe.

1. Die Arten des Schwindels und die Bedingungen für seine Entstehung.

Unter der Bezeichnung Schwindel werden recht verschiedenartige subjektive Erscheinungen zusammengefaßt, die zum Teil als rein physiologisch, zum anderen Teil als pathologisch zu bezeichnen sind. Schwindel nennt man unter anderem das Unbehagen, das viele Menschen befällt, wenn sie aus großer Höhe hinabblicken oder an steiler Wand hinaufblicken. Dies Gefühl kann auch bei der bloßen Vorstellung einer derartigen Situation auftreten; es kann mit einer Art Angstgefühl verbunden sein, doch ist dies nicht unbedingt notwendig.

In der Physiologie und Pathologie wird das Wort Schwindel meistens in anderer Bedeutung gebraucht, nämlich als Ausdruck für eine Täuschung über den Bewegungszustand des Körpers. Im Zustande des Schwindels glaubt man irrtümlich, die umgebenden Objekte drehten sich um den Körper oder dieser drehe sich um irgend eine Achse. Die Täuschung tritt sowohl bei offenen wie bei geschlossenen Augen ein, es scheinen sich die gesehenen, wie unter Umständen auch die getasteten Gegenstände zu bewegen, und auch wenn man mit geschlossenen Augen frei steht oder sitzt, ohne mit den Händen etwas zu berühren, tritt die Illusion der Drehung des Körpers im Raume oder des Raumes um den Körper ein. Welche von diesen beiden Täuschungen auftritt, hängt offenbar von verschiedenen Umständen ab, die sich schwer übersehen und experimentell kaum beherrschen lassen. Unbehagen kann auch bei dieser Art Schwindel hinzukommen, gehört aber nicht so sehr zum Wesen der Sache wie bei dem Schwindel beim Blick aus der Höhe („Höhenschwindel"). Wir beschäftigen uns hier nur mit dem Schwindel der zweiten Art („Scheinbewegungsschwindel").

Man könnte diese Art Schwindel etwa definieren als eine (häufig mit dem Gefühl des Unbehagens verknüpfte) Täuschung über die augenblickliche Stabilität des Körpers; die Täuschung besteht entweder darin, daß man den eigenen Körper bewegt glaubt oder daß man den Eindruck hat, die tatsächlich feststehenden Objekte der Umgebung bewegten sich, und der Körper stände ruhig. Hierin liegt freilich weder eine erschöpfende, noch eine für alle Fälle ausreichende Begriffsbestimmung des Schwindels. Zutreffender, aber den theoretischen Erörterungen der späteren Abschnitte etwas vorgreifend können wir den Schwindel definieren als den Ausdruck eines Mißverhältnisses zwischen den Empfindungen des Bewegungszustandes unseres Körpers, die uns durch das Ohrlabyrinth vermittelt werden, und denjenigen, die die übrigen Sinne zur Quelle haben. Wenn ein Teil der Sinnesorgane signalisiert: der Körper ist in Ruhe, und ein anderer Teil signalisiert: der Körper ist in Bewegung, so resultiert Schwindel, ebenso wenn die Sinnesorgane bezüglich der Umgebung des Körpers widersprechende Eindrücke vermitteln.

Die Bedingungen für das Zustandekommen des Scheinbewegungsschwindels sind sehr mannigfaltig. Ziemlich vollständig zusammengestellt wurden sie schon vor langer Zeit (1826) von Purkinje[1]), der freilich, wie auch viele neuere Forscher, unter den Schwindelerscheinungen die bei Tieren objektiv nachweisbaren motorischen Reaktionen mitrechnete, die auch beim Menschen mit den Schwindelgefühlen verknüpft sein können und sich in der Hauptsache als eine Gegenbewegung gegen eine wahre oder eine vorgetäuschte Bewegung darstellen.

Wir können, auf Purkinjes Einteilung weiter bauend, folgende Entstehungsursachen für den Schwindel aufzählen:

---

[1]) Diese Zusammenstellung findet sich im zweiten Bulletin der naturw. u. bot. Sektion der schles. Ges. f. vaterl. Kultur im Jahre 1826. Abgedruckt nebst den anderen Bulletins über den Schwindel in Auberts physiologischen Studien über die Orientierung, Tübingen 1888. Außerdem ist zu erwähnen Purkinjes Arbeit: Beiträge zur näheren Kenntnis des Schwindels. Medizin. Jahrb. d. österr. Staates (2) 6, 79, 1820.

1. Drehbewegungen des Körpers um eine beliebige im Körper gelegene Achse.

2. Gewisse Progressivbewegungen des Körpers in gekrümmter Bahn, die sich im allgemeinen nach dem Schema der Rotation um eine außerhalb des Körpers gelegene Achse auffassen lassen. Insbesondere kommen hierbei oszillierende Bewegungen in Betracht, wie sie die Schaukeln verschiedener Konstruktion und das schwankende Schiff ergeben. Doch wirken auch kontinuierliche Bewegungen (Karussellbewegung) in gleicher Weise schwindelerzeugend.

3. Durchleitung des galvanischen Stromes durch den Kopf in der Querrichtung, namentlich von Ohr zu Ohr.

4. Lokale Reize und Verletzungen in verschiedenen Teilen des Gehirns (Abscesse, Echinococcen oder Hydatiden, apoplektische Herde).

5. Anämie des Gehirns bei beginnender Ohnmacht und verwandten Zuständen.

6. Gewisse Giftwirkungen, namentlich die des Alkohols. Purkinje gibt (l. c.) an, daß besonders starker Schwindel schon bei den gewöhnlichen Körperbewegungen eintritt, wenn eine Mischung von Weingeist und „Terpentinspiritus“ eingenommen worden ist (schon 20 Tropfen sollen genügen).

7. Bei offenen Augen kann Schwindel unter allen den Bedingungen entstehen, bei denen das Binokularsehen plötzlich gestört oder aufgehoben ist, bei Augenmuskellähmungen, beim Tragen unüberwindbarer Prismen, aber auch, wenn dem einen Auge ein sehr unscharfes Bild, dem anderen ein scharfes geboten wird.

8. Wenn die übrigen Sinne mit Ausnahme des Gesichtssinnes die Wahrnehmung des Ruhezustandes unseres Körpers vermitteln, gleichzeitig aber Gesichtswahrnehmungen Bewegungen des Körpers vortäuschen, tritt ebenfalls Schwindel ein.

9. Bei offenen wie bei geschlossenen Augen kann starker Schwindel infolge von Erkrankungen des inneren Ohres (Labyrinthes) auftreten. Er ist z. B. eines der wichtigsten Symptome der sogenannten Ménièreschen Krankheit (s. u.).

Eine etwas eingehendere Besprechung kann hier nur einem Teil dieser Entstehungsursachen des Schwindels zuteil werden.

Am bekanntesten und wichtigsten ist der Drehschwindel, der bei Rotation des Körpers um seine Längsachse, aber auch bei passiver Rotation um eine zu dieser Längsachse parallele Achse (Karussellbewegung) auftritt. Während solcher Rotation ist subjektiv bemerkbar eine Desorientierung über die Lage des Körpers relativ zu den umgebenden Objekten, zugleich ein mehr oder weniger ausgesprochenes Unbehagen, das sich bis zu wirklicher Übelkeit (Ekel) steigern kann; sehr bald hat man nicht mehr den Eindruck, daß nur man selbst bewegt werde, die umgebenden Objekte fangen scheinbar an sich auch zu drehen, sie stehen nicht mehr fest. Solange man z. B. auf dem Karussell noch den Eindruck hat, daß die umgebenden Häuser und Bäume fest stehen, pflegt auch kein eigentlicher Schwindel aufzutreten.

Nach einer längeren und hinreichend schnellen Drehung in einem bestimmten Sinne tritt beim Anhalten die Empfindung der Drehung im umgekehrten Sinne auf, vorausgesetzt, daß während der Drehung die Augen

geschlossen waren oder daß im Gesichtsfelde sich nur Objekte befanden, die die Drehung vollständig mitmachten (Machscher Drehschwindel).

Hat man aber während der Drehung die feststehenden Objekte an sich vorbeipassieren sehen, so tritt als Nachempfindung eine Scheinbewegung der Gesichtsobjekte in der gleichen Richtung ein wie während der ursprünglichen Drehung (Purkinjescher Drehschwindel).

Drehschwindel der letzteren Art fehlt bei mir fast völlig, ich bemerke ihn höchstens in Andeutungen. Dagegen habe ich nach aktiven Rotationen um die aufrechte Körperlängsachse das deutliche Gefühl, daß die Rotation im gleichen Sinne noch fortbestehe, und zwar sowohl bei offenen wie bei geschlossenen Augen. Dabei besteht ein Zwang, diese Drehbewegung wirklich fortzusetzen; nach hinreichend langer Rotation wird dieser Zwang unwiderstehlich. Scheinbewegung der umgebenden Gegenstände fehlt dabei.

In dieser Hinsicht bestehen erhebliche individuelle Differenzen. Personen, bei denen eine Nachwirkung der Rotation in dem eben beschriebenen Sinne besteht, vertragen bekanntlich das Tanzen mit nur einigermaßen schneller Drehung nicht.

Der ältere Darwin[1]) und Purkinje[2]) fanden, daß die Richtung des Drehschwindels ganz wesentlich von der Haltung des Kopfes während der (aktiven oder passiven) Drehung bestimmt wird. „So ist, wenn man das Gesicht während dem Sichdrehen nach oben wendet, die Richtung des Schwindels, sobald der Kopf wieder in seine gewöhnliche Lage gebracht wird, ein senkrechtes Rad, dessen Querdurchmesser von einer Seite zur anderen geht. Wird der Kopf bei dem Sichdrehen auf die eine oder andere Schulter gelegt, so ist der Schwindel in der Richtung eines senkrechten Rades, dessen Querdurchmesser von vorn nach hinten geht."

Dasselbe gilt für die bei mir eintretenden (scheinbaren) Nachdrehungen. Wende ich bei aktiver Rotation um die Körperachse den Blick zur Decke hinauf, so besteht nach dem Anhalten die Bewegung in gleichem Sinne scheinbar fort, solange ich den Kopf in dieser Lage lasse. Bringe ich ihn aber wieder in die gewöhnliche Stellung, so besteht eine scheinbare Drehung um eine sagittale Achse, mit Neigung, nach der Seite zu fallen. War der Kopf während der Rotation zur Schulter geneigt, so ist die Nachwirkung bei wieder aufgerichtetem Kopf eine Scheindrehung um eine Körperquerachse mit Neigung, vorn- oder hintenüber zu fallen.

Bemerkenswert ist mit Rücksicht auf spätere theoretische Erörterungen, daß nach den Untersuchungen von James[3]) bei zahlreichen Taubstummen durch Rotation kein Drehschwindel ausgelöst werden kann. Unter 519 Taubstummen hatten 186 keinen Drehschwindel, während unter 200 Gesunden nur einer nicht schwindlig wurde.

Auf die weniger genau untersuchten Schwindelerscheinungen bei Drehungen um außerhalb des Körpers liegende Achsen (Karussel, russische Schaukel u. dgl.) kann hier nicht eingegangen werden. Der Schwindel beim Schaukeln in der gewöhnlichen Hängeschaukel ist kompliziert. Da die Bewegung in einem bestimmten Sinne immer nur kurz dauert und gleich wieder durch die gegensinnige abgelöst wird, kommt es beim plötzlichen Anhalten

---

[1]) Zoonomia, übersetzt von Girtanner. — [2]) 10. Bull. d. naturw. Sektion d. schles. Ges. f. vaterl. Kultur 1825. Abgedruckt in Auberts physiol. Studien über die Orientierung. — [3]) Amer. Journ. of Otology **4** (1882).

meist nicht zu deutlichen Nachempfindungen, wenigstens nicht zu Bewegungsempfindungen, sondern nur ev. zum Gefühl des unsicheren Stehens, nicht selten verbunden mit Übelkeit. Auch kann hier wie bei der Nachwirkung des Schlingerns und Stampfens eines Schiffes die eigentümliche Erscheinung einer rhythmischen Nachempfindung auftreten, d. h. man hat nach längerer Zeit die Empfindung, als ob die rhythmische Bewegung noch immer anhielte. Genauer sind diese Eindrücke, die oft erst nach einer beträchtlichen Latenzzeit auftreten, meines Wissens nicht erforscht.

Alle die besprochenen Erscheinungen des Drehschwindels treten, allerdings im verminderten Maße, auch auf, wenn die Gesichtswahrnehmungen während und nach der Rotation ausgeschlossen bleiben. Der auf dem Karussell schwindlig Gewordene fühlt bei geschlossenen Augen gleichsam den Boden unter den Tastflächen seiner Füße weggleiten, und dem bei Rotation um die Längsachse (Tanzbewegung) schwindlig Gewordenen scheint der Tisch oder Stuhl, an dem er sich bei geschlossenen Augen hält, seitwärts auszuweichen.

Ob ein Mensch, der weder durch den Gesichtssinn, noch durch den Tast- und Muskelsinn die umgebenden Gegenstände wahrnimmt, schwindlig werden (d. h. das Gefühl des Schwindels haben) kann, ist nicht bekannt. Es ist mir sehr wahrscheinlich, daß er die objektiven Schwindelerscheinungen, das Taumeln nach einer Rotation, zeigen wird, richtigen Schwindel aber nicht oder nur in geringem Maße fühlen würde.

Der sogenannte „galvanische Schwindel“ ist schon von sehr vielen Autoren untersucht und beschrieben worden. Die ersten genaueren Beobachtungen rühren von Purkinje[1]), Remak[2]) und Brenner[3]) her. Hitzig[4]) behandelte die Erscheinungen des galvanischen Schwindels in ausführlicher Abhandlung, ebenso später Kny[5]).

Der galvanische Schwindel tritt am leichtesten auf bei Querdurchströmung des Kopfes, wobei die Elektroden beiderseits in der *Fossa mastoidea* aufgesetzt sind. Querdurchströmung weiter vorn oder hinten wirkt schwächer, ebenso Schrägdurchströmung. Durchströmung in der Richtung von vorn nach hinten wirkt bei mäßiger Stromstärke gar nicht schwindelerzeugend.

Die Empfindlichkeit verschiedener Personen erweist sich als sehr verschieden, bei manchen Personen bewirkt schon ein Strom von vier bis fünf Daniells Schwindel, andere brauchen (bei gleichen Zuleitungsverhältnissen) das Doppelte. Am reinsten ist die Erscheinung bei geschlossenen Augen oder im Dunkeln zu beobachten. Man hat bei Stromschluß das Gefühl des Umsinkens nach der Kathodenseite, bei Stromöffnung das Gefühl der umgekehrten Bewegung. Da die vom Rumpf und den Extremitäten ausgehenden Hautsensationen mit dieser Scheinbewegung in Widerspruch stehen, qualifiziert sich das durch den Strom bewirkte Gefühl deutlich als Schwindelgefühl.

Bei schwachen Reizen tritt eine objektiv nachweisbare Reaktion weder bei Stromschluß noch -Öffnung ein. Bei stärkeren Strömen wird eine solche bemerkbar, und zwar in Form einer Gegenbewegung gegen die Scheinbewegung,

---

[1]) Rusts Magazin f. d. ges. Heilk. **23**, 297, 1827. — [2]) Galvanotherapie d. Nerven- und Muskelkrankheiten, Berlin 1858. — [3]) Unters. u. Beobacht. a. d. Gebiete d. Elektrotherapie, Leipzig 1868. — [4]) Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1871 und Gesamm. Abhandl. **1**, 336. — [5]) Arch. f. Psychiatr. **18** (3).

d. h. man neigt Kopf und Rumpf beim Stromschluß nach der Anode, bei Öffnung nach der Kathode hin.

Eine im Dunkeln frei stehende Person kann schon durch mäßig starke Ströme zum Umstürzen nach der Anodenseite gebracht werden. Bei schwachen Strömen hört der Schwindel nach der Schließung wie nach der Öffnung aber bald auf. Bei starken Strömen ist während der Durchströmung dauerndes Schwindelgefühl vorhanden, und auch der Kathodenöffnungsschwindel hält minutenlang an.

Bei geöffneten Augen treten Scheinbewegungen der Gesichtsobjekte auf, und zwar namentlich bei starken Strömen in ziemlich komplizierter Weise. Abweichend von Hitzig und Kny finde ich unter geeigneten Umständen das Auftreten von Scheinbewegungen als erstes Symptom der Stromwirkung, d. h. bei Stromstärken, die noch keinen Schwindel machen. Die hier in Betracht kommenden Scheinbewegungen beschrieb schon Purkinje. Es ist im wesentlichen eine Kreisbewegung des gesamten Gesichtsfeldes. „Die Richtung der Kreisbewegung dieses Schwindels geht aufwärts von der rechten zur linken Seite, wenn der Kupferpol im rechten Ohre, der Zinkpol im linken ist.“ (Purkinje, l. c.)

Am leichtesten und schon bei ganz schwacher Galvanisierung beobachtet man diese Scheindrehung des Gesichtsfeldes, wenn man im dunklen Raume eine isolierte leuchtende Linie betrachtet. Diese Linie, die vertikal gestellt sein möge, macht bei Stromschluß mit ihrem oberen Ende einen Ausschlag nach der Kathodenseite und erscheint dann, solange der Strom geschlossen ist, in andauernder Drehbewegung in der gleichen Richtung. Dabei ist die paradoxe Erscheinung zu bemerken, daß trotz dieser anhaltenden Scheindrehung die Linie sich nicht weiter von der Vertikallage zu entfernen scheint als im Moment des Stromschlusses.

Um im hellen Zimmer, wenn das Gesichtsfeld mit den Bildern der umgebenden Gegenstände erfüllt ist, nennenswerte Scheinbewegungen zu erzielen, bedarf es wesentlich höherer Stromstärken.

Auch wenn man, auf dem Rücken liegend, eine an der Decke angebrachte Linie betrachtet, macht diese bei Durchleitung des Stromes von Ohr zu Ohr andauernde Drehbewegung, die aber (abweichend von dem soeben erwähnten Falle der vertikalen Linie) bald zu einer völligen Desorientierung über die Lage der gesehenen Linie relativ zu den Körperachsen führt. Es gibt für unseren Gesichtssinn auf horizontaler Fläche keine Richtung, die so ausgezeichnet wäre wie die vertikale Richtung einer auf vertikaler Ebene gezeichneten Geraden. Vgl. hierzu: Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **16**, 384 f.

Daß während des Eintrittes galvanischen Schwindels objektiv nachweisbare Augenbewegungen zwangsmäßig, d. h. ohne Wissen und Willen der Versuchsperson, auftreten, dürfte Hitzig zuerst festgestellt haben. Um sie nachzuweisen, bedarf es schon ziemlich starker Ströme. Man beobachtet horizontalen Nystagmus, d. h. eine schnell ruckende Bewegung in der Richtung des positiven Stromes, gefolgt von langsamerer Rückbewegung. Damit verknüpft sich, wie es scheint stets, eine Rollbewegung des Bulbus, bei der das obere Ende des Vertikalmeridians in der Richtung des positiven Stromes, also zur Kathode hin abgelenkt wird.

Diese Rollbewegung, welche das Auftreten der Purkinjeschen Raddrehung des Gesichtsfeldes im Moment des Stromschlusses erklärt und somit

die Hauptursache des galvanischen Schwindels ist, erfolgt (wenigstens bei mir) schon bei Stromstärken, bei denen ein horizontaler Nystagmus noch völlig fehlt.

Der langsamen Scheindrehung des Gesichtsfeldes während der dauernden Durchströmung entspricht natürlich keine dauernde Rotation des Auges, und selbst das Bestehen eines minimalen, dem objektiven Nachweis entzogenen rotatorischen Nystagmus ist nicht recht wahrscheinlich. Es ist daran zu erinnern, daß auch bei Schiefhaltung des Kopfes ohne Galvanisierung eine im Dunkeln isoliert gesehene Lichtlinie anhaltend langsame Scheindrehung erfährt.

Über den Effekt isolierter elektrischer Reizung einzelner Bogengänge vgl. unten S. 788.

Oben wurde der Satz aufgestellt, daß Schwindel im allgemeinen dann auftritt, wenn die Angaben des Labyrinths einerseits und der übrigen Sinnesorgane anderseits über den Bewegungszustand des Körpers in Widerspruch miteinander stehen. Die bisher besprochenen Erscheinungen des Drehschwindels sowohl wie die des galvanischen Schwindels werden nun heutzutage wohl fast von allen Autoren so aufgefaßt, daß das Labyrinth (das Bogengangsystem), durch mechanischen oder elektrischen Reiz erregt, Bewegungsempfindung, speziell Drehungsempfindung auslöst; sobald diese Empfindungen mit den vom Gesichts- und Tastsinn vermittelten in Widerspruch geraten, tritt Desorientierung über den Bewegungszustand, mit anderen Worten Schwindel ein.

Umgekehrt kann nun aber auch das Auge die eigentliche Auslösungsstelle für das Schwindelgefühl sein. Wenn die spezifischen Organe der Bewegungsempfindungen und der Tastempfindung die Erkenntnis vermitteln, daß der Körper unbewegt ist, und nun ein Gesichtseindruck eintritt, den wir gewohnheitsmäßig auf eine Körper- oder Kopfbewegung beziehen, tritt Schwindel auf. Begreiflicherweise kann dieser Fall nur unter ganz bestimmten Bedingungen verwirklicht sein: Keine Desorientierung, kein Schwindel tritt ein, wenn sich ein Gesichtsobjekt bewegt, das nur einen kleinen Teil des Gesichtsfeldes einnimmt (etwa eine vor uns stehende andere Person). Selbst eine plötzlich unerwartete Bewegung verwirrt unsere Orientierung nicht. Anders liegt die Sache, wenn ein großer Teil des Gesichtsfeldes plötzlich eine gleichsinnige, gleichförmige und zumal unerwartete Bewegung ausführt; das geschieht z. B., wenn man in einen großen Spiegel blickt und dieser, ohne daß man es sogleich bemerkt, durch Luftzug leicht bewegt wird: die in ihm gespiegelten Wände des Zimmers mit allem, was an ihnen steht oder hängt, führen dann eine Scheinbewegung aus, die bei als so stabil bekannten Objekten unerwartet ist und unserem Bewußtsein leicht als Bewegung unseres eigenen Körpers erscheint. Andere Empfindungen aber haben wir nicht, die auf diese Bewegung hindeuten, daher das Resultat, das Schwindelgefühl. Ganz Ähnliches beobachtet man, wenn man an einem stehenden Eisenbahnzuge entlang geht, dessen Bild etwa die Hälfte des Gesichtsfeldes ausfüllt; beginnt der Zug sich unerwarteterweise zu bewegen, so haben wir das Gefühl, der ganze Boden drehe sich mit uns, es wird uns schwindlig. Erwarten wir in einem solchen Falle den eintretenden Bewegungsvorgang oder beobachten wir ihn mit Aufmerksamkeit, so fehlt im allgemeinen jede Spur von Schwindel.

Ich betone diesen Schwindel visuellen Ursprunges besonders, weil seine Existenz in der Regel nicht so sehr beachtet wird wie die des labyrinthären Schwindels; und doch sind beide Formen auf ganz den gleichen Umstand zurückzuführen, auf die Discrepanz zwischen den labyrinthären und den optischen Bewegungsempfindungen. Ich zweifle nicht, daß von Blinden oder von Beobachtern, die die Augen geschlossen halten, unter Umständen auch die Discrepanz zwischen den labyrinthären Empfindungen und denjenigen, die von der Haut und den Muskeln ausgelöst werden, zu Schwindel führen kann.

Ein Hinweis auf die Möglichkeit, daß selbst ein Widerspruch zwischen Gesichtseindruck und Muskelsinnseindruck Schwindel oder schwindelähnliche Gefühle erzeugen kann, scheint mir in der oben angeführten Tatsache zu liegen, daß Personen, die an Brillentragen nicht gewöhnt sind oder ungeeignete Brillen tragen, häufig angeben, daß sich alles vor ihnen zu drehen scheine, mit anderen Worten, daß sie Schwindel empfinden. Jeder kann sich von etwas Ähnlichem überzeugen, wenn er für einige Zeit eine Brille trägt, die seine Augen zu einer ungewöhnlichen, ihren muskulösen Gleichgewichtsverhältnissen nicht entsprechenden Stellung zwingt. Schon beim Aufsetzen einer solchen Gläserkombination pflegt ein unbehagliches schwindelähnliches Gefühl aufzutreten, deutlicher noch, wenn die Brille wieder abgenommen wird und die Augen wieder in ihre gewohnte Stellung zurückkehren sollen. Besonders deutlich und auch etwas länger anhaltend ist die Desorientierung nach dem Tragen von Gläsern, die eine Höhendifferenz beider Gesichtslinien erzeugen. Viel länger noch besteht ein ähnlicher Gesichtsschwindel bei plötzlich eintretenden Augenmuskellähmungen, speziell Trochlearislähmung, bzw. den diesen in ihrer physiologischen Wirkung gleichzustellenden Schieloperationen. Wenngleich dieser Schwindel mit einem richtigen Drehschwindel nicht allzuviel Ähnlichkeit mehr aufweist, ist die von den Patienten allgemein gebrauchte Bezeichnung doch immerhin beachtenswert und gibt zu erkennen, daß es sich zum mindesten um verwandte Zustände handelt.

Nach ihrer Entstehung noch weiter vom Drehschwindel abweichend und doch nicht ohne eine gewisse subjektive Ähnlichkeit ist eine eigentümliche schwindelartige Empfindung, die bei ruhiger Betrachtung verwirrender Bilder auftritt; ist z. B. auf einem Blatt Papier ein und derselbe Druck zweimal mit geringer Seiten- oder Höhenverschiebung angebracht, so gibt das einen seltsam verwirrenden Eindruck, ähnlich demjenigen bei Betrachtung einer richtigen Druckschrift mit falschem Konvergenzgrad; nur ist bei dem Doppeldruck die Verwirrung noch aufdringlicher, weil hier nicht eines der beiden Bilder durch Exklusion eines Auges oder Wettstreit beseitigt werden kann. In der Tat haben denn auch viele Personen bei Betrachtung eines solchen verschobenen Druckes ein geradezu peinliches Gefühl, das sie mit Schwindel zu vergleichen pflegen. Es wäre dies ein Schwindel rein visuellen Ursprunges, das Endglied der Reihe von Schwindelarten, an deren anderem Ende der (rein labyrinthäre) Drehschwindel liegt, und deren Mittelglieder in den oben erwähnten Fällen zu finden sind, bei denen die Augenmuskeln eine wichtige Rolle spielen.

Vgl. übrigens bezüglich des Gesichtsschwindels und der Scheinbewegungen oben S. 368 ff.

Über die übrigen Arten der Entstehung von Schwindel, die oben aufgezählt wurden (und zu denen wohl noch weitere hinzugerechnet werden könnten), läßt sich zurzeit vom physiologischen Standpunkte noch nicht viel sagen. Auf Grund unserer allgemeinen Auffassung über die Entstehung des Schwindels versteht es sich von selbst, daß alle diejenigen Momente, welche die Funktion des Labyrinths oder des Augenmuskelapparates durch Angriff in der Peripherie oder an irgend einem Punkte des Zentralorganes stören, Schwindel oder die Disposition zu Schwindel herbeiführen müssen, um so mehr, je schneller die Störung eintritt; daher also der Schwindel bei Labyrintherkrankungen, bei Lähmungen oder Verletzungen der Augenmuskeln oder bei irgendwelchen Erkrankungen in den Gehirnteilen, die mit diesen Organen in nahem Zusammenhange stehen, vor allem auch im Kleinhirn, auf dessen Rolle noch weiter unten zurückzukommen sein wird.

Recht beachtenswert ist jedenfalls die Tatsache, daß der Augenmuskelapparat, zufolge seiner engen funktionellen Verknüpfung mit dem Labyrinth, für die Entstehung des Schwindels eine wesentlich andere Rolle spielt als die übrige Muskulatur des Körpers. Umfangreiche Innervationsstörungen am Bewegungsapparate des ganzen Körpers, vom Kopfe an abwärts, mögen sie die centripetalen oder die centrifugalen Nervenbahnen betreffen, können die Stabilität des Körpers schwer schädigen, können auch beispielsweise das Stehen und Gehen ohne die regulierende Hilfe des Auges unmöglich machen; zu Schwindel aber führen sie nicht. Der Tabiker, der bei geschlossenen Augen umfällt, kann dabei Schwindel empfinden. Aber er fällt nicht, weil er schwindlig wäre, sondern er empfindet Schwindel infolge der plötzlichen unvorhergesehenen Drehbewegung.

Man kann nun freilich sagen, auch der Gesunde, der, durch heftige Rotation schwindlig gemacht, taumelt, tut dies nicht infolge des Schwindelgefühles, sondern weil das durch die Rotation vorübergehend geschädigte Sinnesorgan (Labyrinth) an Präzision der reflektorischen Innervation eingebüßt hat und den Körper nicht mehr stabil zu halten vermag. Aber diese Schädigung ist eben stets mit dem Gefühl des Schwindels verbunden, die Störung der reflektorischen Muskelinnervation bei Tabes u. dgl. tritt dagegen, obgleich äußerlich häufig ähnlich erscheinend, ohne Schwindel als notwendige Begleiterscheinung auf.

2. Die Reflexe bei Schieflagen des Kopfes oder des ganzen Körpers.

Bei gewissen Progressivbewegungen in geradliniger oder krummer Bahn sowie bei Drehungen des Körpers um irgend eine Achse treten bestimmte Reflexe auf. Wir können hier in der Hauptsache absehen von gewissen Reflexbewegungen, die in den Extremitäten auftreten können, wenn der Körper mit erheblicher Geschwindigkeit nach unten, in der Richtung der Schwere sinkt oder stürzt; das Erheben der Hände, der Versuch, etwas Festes zu ergreifen, Reaktionen, die hierbei fast regelmäßig beobachtet werden, könnten allerdings als echte Reflexbewegungen bezeichnet werden, denn sie sind schon beim kleinen Kinde, das noch keinerlei Erfahrung über die eventuelle Zweckmäßigkeit dieser Bewegungen hat, deutlich ausgebildet. In

dieselbe Kategorie dürften die Bewegungen gehören, welche die Katze ausführt, um beim Falle aus der Höhe auf die Füße zu fallen.

Mehr Interesse bietet eine andere Gruppe von Reflexen, die aufs engste mit Bewegungen des Körpers verknüpft sind.

Am genauesten erforscht sind die von der Lageveränderung abhängigen Augenbewegungen [1]). Wird der Kopf um eine sagittale Achse seitswärts zur Schulter geneigt, so führen beide Augen sogenannte Rollungen oder Raddrehungen in entgegengesetzter Richtung aus. Die Richtung der Blicklinien kann dabei unverändert bleiben, es ist eine reine Rollung des Bulbus annähernd um die Blicklinie als Achse, falls der Blick geradeaus in die Ferne gerichtet ist.

Hunter, der diese Rollungen zum ersten Male beschrieb, glaubte, sie kompensierten die Kopfdrehung völlig, so daß der Vertikalmeridian der Netzhaut zunächst vertikal bliebe. Beim Anhalten der Bewegung aber sollte die Bewegung alsbald wieder völlig rückgängig werden, auch wenn der Kopf in der schiefen Lage verharrte. J. Müller bestritt dies. A. Hueck wiederum meinte, Kopfneigungen bis zu 25 bis 28° würden völlig kompensiert. Darüber hinaus sollte das Auge den Kopfbewegungen folgen. In der Folgezeit wurden dann die Raddrehungen wieder von verschiedenen Autoren bestritten, von anderer Seite wurde ihre Existenz wieder nachgewiesen (Zusammenstellung der Literatur s. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 3, 331).

A. Nagel [2]) maß die kompensatorischen Raddrehungen mit Hilfe seines Hornhautastigmatismus und fand, daß etwa ein Sechstel der Kopfneigung durch Raddrehung kompensiert werde. Mulder [3]) zeigte dann, daß eine Proportionalität zwischen Kopfdrehung und Bulbusdrehung nicht bestehe, was ich [4]) bestätigen konnte, und zwar mittels der gleichen Versuchsmethode (Bestimmung des blinden Fleckes), durch die Contejean und Delmas [5]) wieder einmal die Nichtexistenz von kompensatorischen Raddrehungen hatten nachweisen wollen.

Wenn ich den Kopf um die Blicklinie des geradeaus gerichteten rechten Auges nach rechts neige, bleibt das Auge durch kompensatorische Rollung um Beträge zurück, die aus der nachstehenden Tabelle ersichtlich sind (Mittel aus 20 Versuchsreihen):

Kopfdrehung	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°
Raddrehungswinkel	1,3°	3,8°	5,2°	5,4°	6,3°	6,7°	6,8°	8,0°	8,1°	8,6°
Kompensiert wurden somit von der Kopfdrehung . .	$\frac{1}{7,7}$	$\frac{1}{5,2}$	$\frac{1}{5,8}$	$\frac{1}{7,4}$	$\frac{1}{7,9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{10,3}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{11,1}$	$\frac{1}{11,8}$

Fig. 125 (a. f. S.) veranschaulicht dieses Resultat.

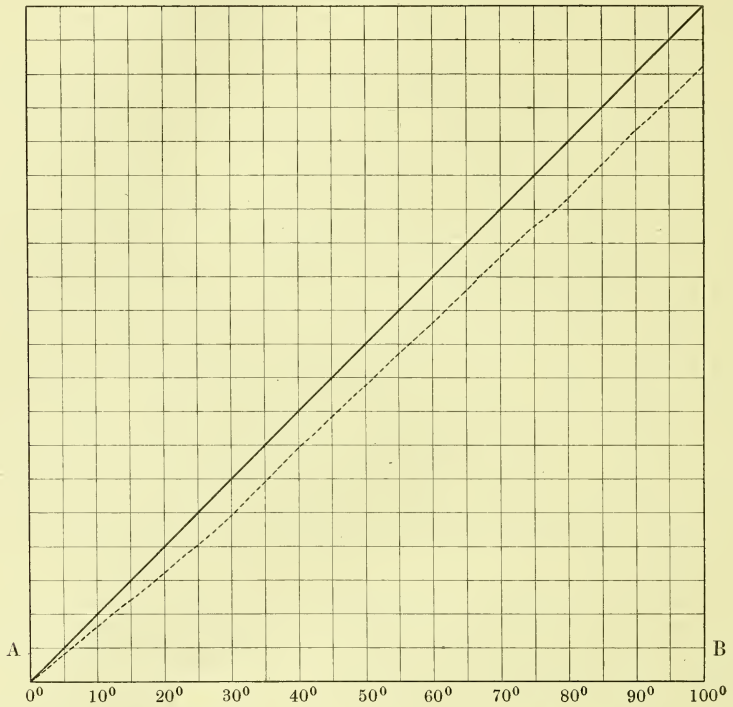
Delage [6]) hat die Untersuchung auf alle vier Quadranten der Kreisdrehung ausgedehnt. Seine Ergebnisse scheinen indessen mit einer gewissen, wohl in der Methode begründeten Unsicherheit behaftet zu sein, da sie in einem bestimmten Punkte, der unten S. 773 erwähnt wird, von den Resultaten anderer Beobachter abweichen.

[1]) Vgl. auch oben S. 317 f. — [2]) Arch. f. Ophthalmol. **17**, 247, 1871. — [3]) Ebenda **21**, 68, 1875. — [4]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **12**, 331. — [5]) Arch. de physiol. (5), **6**, 687, 1894. — [6]) Arch. zoolog. expér. (4), **1**, 261—306, 1903.

Bei Tieren können die Rollungen leichter gemessen werden. Daß bei vielen Tieren solche vorkommen, hatte schon Hueck (l. c.) und v. Gräfe[1]) gesehen. Besonders ausgiebig sind die Drehungen bei Kaninchen und anderen Nagern, hier am ausgeprägtesten bei Drehung des Kopfes um die Querachse.

Zur Demonstration der kompensatorischen Augenbewegungen eignen sich Kaninchen sehr gut. Man schneidet die langen Haare in der Umgebung des Auges ab, kokainisiert dieses und legt auf den Corneascheitel einen etwa 5 cm langen, in der Mitte 3 mm breiten, an den Enden sich verschmälernden Streifen Löschkarton auf, der durch Capillarität von selbst anklebt. Erteilt man dann dem Kopfe passive Drehungen um die Querachse, so erkennt man leicht die starken kompen

Fig. 125.



Dauernde kompensatorische Rollungen bei Seitwärtsneigung des Kopfes. Die untenstehenden Zahlen geben die Kopfneigung an. Aus dem Verhältnis, in dem die über einer Zahl stehende und bis zu der ausgezogenen Diagonale reichende Ordinate durch die punktierte Linie geteilt wird, ergibt sich, wie groß der durch Bulbusrollung kompensierte Teil der Kopfneigung ist.

satorischen Rollungen. Fesselung des Tieres und Anlegen eines Lidhalters ist überflüssig. Auch bei Fröschen gelingt diese Demonstration leicht.

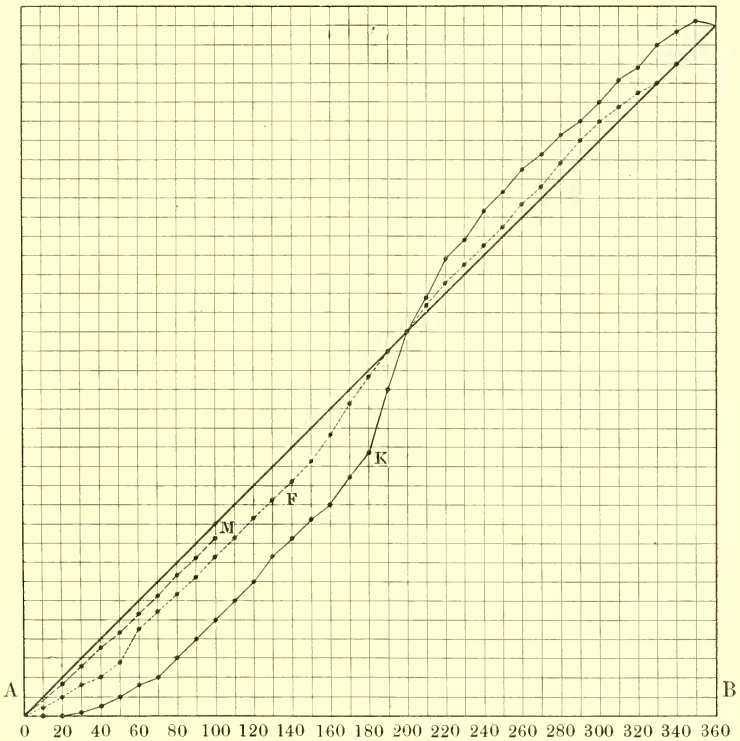
In Fig. 126 sind die Bulbusrollungen eines Frosches und eines Kaninchens nach demselben Prinzip wiedergegeben, wie oben in Fig. 125 die meines eigenen rechten Auges. Die letztere Kurve ist auch in die Fig. 126 mit aufgenommen. Die Diagonale des Quadrates repräsentiert aber hier die Kopfdrehung um 360⁰, für Kaninchen und Frosch um die Querachse, für den Menschen um die sagittale Achse des Kopfes. Man erkennt leicht, daß beim Kaninchen die Kopfdrehungen bis zu etwa 25⁰ durch entgegengesetzte Augenrollung völlig kompensiert werden, und zwar geschieht dies dauernd, das Auge bleibt in dieser Stellung stehen. Sehr bemerkenswert ist, daß die bei diesen Untersuchungen gewonnenen Kurven verschieden aussehen je nach der Drehungsrichtung, die man dem Tiere erteilt. Das-

[1]) Arch. f. Ophthalmol. 1, 28, 1854.

selbe hat neuerdings Delage[1]) in interessanten Versuchsreihen für seine eigenen Augen festgestellt, indem er sich, auf einem Stuhle unbeweglich befestigt, um eine Achse drehen ließ, die in sagittaler Richtung durch die Nasenwurzel ging, und zwar um volle 360°. Die Messung der hierbei eintretenden Rollungen vermochte er nach der von Javal[2]) und A. Nagel[3]) angewandten Methode mit Hilfe seines Hornhautastigmatismus zu bewerkstelligen.

Delage fand, ebenso wie ich früher bei Tieren, daß nicht etwa einer bestimmten Seitenneigung des Kopfes ein bestimmter Rollungswinkel entspricht (hierbei ist konstante Einhaltung der Blickrichtung vorausgesetzt), sondern daß der

Fig. 126.



Graphische Darstellung der kompensatorischen Rollungen bei Drehung des Kopfes um die Augenachse, *M* vom Menschen, *F* vom Frosch, *K* vom Kaninchen. Das Ordinatenstück zwischen der ausgezogenen Diagonale und der Kurve gibt in Winkelgraden an, um wieviel der Augapfel hinter der Kopfdrehung zurückbleibt (unterer Teil der Figur) oder ihr vorauseilt (oberer Teil der Figur) — negative und positive Rollung.

Rollungswinkel im allgemeinen ein verschiedener ist, je nachdem die betreffende Seitenneigung durch Drehung rechtsherum oder linksherum erreicht wurde.

Die überraschende Angabe Delages, daß bei einer bestimmten Seitenneigung beide Augen zwar gleichsinnige, aber im allgemeinen verschieden große Rollungen (im Sinne der Kompensation der Kopfdrehung) ausführen, konnte von Angier[4]) nicht bestätigt werden. Weder für ihn selbst, noch für mich und andere Versuchspersonen traf jene Angabe zu, die also wohl auf einer persönlichen Besonderheit des Augenmuskelapparates bei Delage beruhen muß. Angier untersuchte die Augenstellung mit Hilfe von Nachbildern.

---

[1]) Arch. de zoolog. expér. (4) **1** (1903). — [2]) In der französischen Ausgabe von Helmholtz' Physiologischer Optik, S. 671. — [3]) v. Gräfes Arch. f. Ophthalm. **17**, 247, 1871. — [4]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorg. **37**, 1905.

Wegen der zum Teil recht erheblichen Verschiedenheiten, welche die kompensatorischen Raddrehungen bei verschiedenen Tierklassen aufweisen, vgl. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 12, 346 f. Dort ist auch beschrieben, wie bei manchen Tieren mit leichtbeweglicher Halswirbelsäule die kompensatorischen Augenbewegungen durch entsprechende Drehungen des ganzen Kopfes ergänzt oder (bei Tieren mit unbeweglichen Augen, wie den Eulen) ersetzt werden.

Bei Tieren sieht man auch häufig andere Kopfbewegungen als solche um die Augenachse durch Augenbewegungen teilweise kompensiert. Sehr bekannt ist das von den Fischen, die im allgemeinen die Tendenz erkennen lassen, bei Schwankungen des Körpers um seine Längsachse die Äquatorialebenen der Augen vertikal zu erhalten. Auch beim Menschen kommt Ähnliches vor. Breuer[1]) hat gefunden, daß Blinde Drehungen des Kopfes um die Querachse (also mit Hebung und Senkung des Kinnes) mit Hebung und Senkung der Augenachsen kompensieren. Am Sehenden kann man dies weniger leicht demonstrieren, weil die Fixationstendenz hemmend wirkt. Kleine Kinder zeigen dagegen diese Kompensationsbewegungen, die entschieden reflektorischen Charakter tragen, zuweilen sehr deutlich. Im Dunkelzimmer fehlen übrigens diese Reflexbewegungen auch beim sehenden Erwachsenen nicht ganz, wovon man sich unter anderem durch Momentbeleuchtung überzeugen kann (auch durch Nachbilder). Wechselt man bei geschlossenen Augen zwischen aufrechter und vornübergebeugter Haltung und betastet währenddessen mit leicht aufgelegten Fingern die Lider, so fühlt man deutlich, wie bei der Neigung nach vorn die Hornhaut nach oben, bei der Aufrichtung nach abwärts rollt.

Neben diesen Bewegungen der Augen, die zu einer von der normalen Ruhe- und Gleichgewichtsstellung abweichenden Lage der Augen führen, gibt es auch solche, die nur vorübergehend sind und mit dem Aufhören der Kopfbewegung rückgängig werden. Sie werden im folgenden Abschnitte besprochen.

3. Die sogenannten objektiven Schwindelerscheinungen.

Unter den gleichen Bedingungen, unter denen Schwindel entsteht, lassen sich gewisse objektive Reaktionen an den vom Schwindel befallenen Individuen erkennen. Da sie auch bei Tieren beobachtet werden können und hier die Möglichkeit vorliegt, sie zu weit höherer Intensität zu treiben als beim Menschen, hat man die Untersuchungen an Tieren begreiflicherweise besonders häufig und gründlich angestellt. Viele Autoren bezeichnen auch die als Erfolg der raschen passiven Rotationen auftretenden Reaktionen direkt als Schwindel (Drehschwindel). Ich verstehe indessen unter Schwindel stets nur jene bestimmte Gruppe subjektiver Erscheinungen, wie wir sie im vorletzten Abschnitte behandelt haben, und vermeide die Anwendung des Ausdruckes auf die objektiven Reaktionen, weil wir uns erstens nicht davon überzeugen können, inwieweit bei Tieren mit den betreffenden Reaktionen Schwindelgefühl verknüpft ist, und weil es zweitens unter den objektiven Reaktionen solche gibt, deren Bezeichnung als Schwindel entschieden nicht paßt und auch nicht üblich ist. Die Abgrenzung solcher Reaktionen aber gegen die anderen, die man mit größerem Recht als Schwindelreaktionen bezeichnen könnte, ist

[1]) Med. Jahrb. d. Wien. Ärzte 1874.

eine unscharfe. Zur letzteren Gruppe gehören hauptsächlich nach Drehung auftretende Nachbewegungen des ganzen Körpers, zur ersteren Bewegungen des Kopfes, der Augen und des ganzen Körpers, die während der Rotation auftreten.

a) Augen- und Kopfnystagmus bei Rotation.

Die Erscheinungen des Nystagmus waren großenteils schon Purkinje bekannt. Später wurden sie am Menschen besonders von Breuer, an Tieren von Ewald genauer studiert. Neuerdings hat v. Stein zahlreiche Beobachtungen über Nystagmus an Gesunden und an Ohrleidenden (Taubstummen) angestellt (Zentralbl. f. Physiol. **14**, 222, 1900). Näheres Eingehen auf diese Versuche unterlasse ich, da das Neue, was sie bringen, doch wohl erst in ausführlicherer Darlegung begründet sein müßte.

Bei nicht zu langsamer Rotation um die Körperlängsachse tritt beim Menschen ein deutlicher horizontaler Augennystagmus (= Augenschwanken) auf; die Augen bleiben zunächst etwas hinter der Kopfdrehung zurück, sie führen eine gewissermaßen kompensatorische Drehung aus, durch die die Blickrichtung trotz der Kopfdrehung für eine kurze Zeit annähernd dieselbe bleibt. Alsdann geht bei anhaltender Drehung das Auge wieder in die Mittellage (Richtung geradeaus) zurück. Diese letztere Bewegung vollzieht sich bei weitem schneller als die erste; sie wird sogleich wieder von einer neuen kompensatorischen Drehung abgelöst usf. So kommt ein regelmäßiger Wechsel schneller und langsamer Augenbewegungen zustande, ganz ähnlich wie wenn man in der Eisenbahn zum Fenster hinausblickt und die vorüberziehenden Objekte betrachtet. Namentlich bei Kindern sieht man bekanntlich diesen Nystagmus in der Eisenbahn sehr deutlich; die Augen folgen verhältnismäßig langsam den Objekten, um bei deren Verschwinden hinter dem Fensterrahmen schnell wieder in der Fahrtrichtung vorzufliegen und ein neues Gesichtsobjekt zu erfassen. Von dem erstbeschriebenen Rotationsnystagmus unterscheidet sich aber dieser „Eisenbahnnystagmus“ ganz wesentlich dadurch, daß ersterer auch bei geschlossenen Augen, im Dunkeln und sogar bei Blinden auftritt, und daß er sich nicht willkürlich unterdrücken läßt. In der Eisenbahn kann man durchs Fenster „ins Leere“ starren, ohne ein Objekt zu fixieren, dann bleibt der Nystagmus aus, wie stets im Dunkeln.

Den Nystagmus bei Drehung mit geschlossenen Augen kann man, wie Breuer zeigte, leicht erkennen, indem man die Finger auf die geschlossenen Augenlider eines anderen legt, mit dem man sich zusammen auf einer Drehscheibe drehen läßt.

Derselbe Horizontalnystagmus tritt auch ein, wenn die Rotation um eine außerhalb des Körpers liegende senkrechte Achse erfolgt (Karussellbewegung) mit Blick nach der Achse oder von der Achse weg. Er erlischt jedoch, wenn die Rotation gleichmäßig geworden und die Bewegungsempfindung verschwunden ist.

Über den Nystagmus bzw. sein häufiges Fehlen bei Taubstummen vgl. S. 789.

Ein vollkommen analoger Nystagmus der Augen kommt auch bei Rotation des Körpers oder Kopfes um andere Achsen als die Körperlängsachse zustande. Gut bekannt ist ein solcher Nystagmus bei Drehungen um die

Sagittalachse oder um die festgestellte Blicklinie als Achse. Hierbei treten, wie schon oben (S. 771) erwähnt, kompensatorische Rollungen der Augen ein. Diese schießen anfangs erheblich über das Maß hinaus, das nachher beibehalten wird; bei einer schnellen Neigung des Kopfes auf die rechte Schulter machen beispielsweise beide Augen Drehungen mit dem oberen Ende des Vertikalmeridians nach links. Erfolgte die Kopfneigung hinreichend schnell, so ist der Impuls zur kompensatorischen Rollung so stark, daß sie die Kopfneigung fast völlig kompensiert, den vertikalen Netzhautmeridian also nahezu senkrecht hält. Sowie aber die Kopfbewegung zur Ruhe kommt, wird die Rollung durch eine entgegengesetzte Drehung wieder rückgängig, bis zu jenem relativ kleinen Betrage von Dauerkompensation der Seitenneigung, von dem oben des näheren die Rede war. Jene vorübergehende Rollung nun, die während der Kopfbewegung eintritt, ist keine kontinuierliche, sondern eine nystagmische; der Vertikalmeridian des Auges folgt zunächst immer nur einem gewissen Betrage der Kopfneigung, um dann mit einem schnellen Ruck wieder annähernd in die Vertikallage zurückzugehen. Bei einer schnellen Seitwärtsneigung des Kopfes um 90^0 erfolgen etwa 6 bis 10 solcher Stöße des „Nystagmus rotatorius".

Rotiert der Körper in horizontaler Rücken- oder Bauchlage um die Blicklinie eines Auges, so erfolgen ebenfalls nystagmisch intermittierende vorübergehende Rollungen im Sinne der Drehungskompensation, sie werden jedoch, im Gegensatz zu dem Falle der vorhin beschriebenen, mit Verlagerung der Kopfachsen gegen die Vertikale verknüpften Drehungen alsbald wieder völlig rückgängig, sobald die Bewegung anhält.

Alle diese Bewegungen betreffen stets beide Augen annähernd in gleichem Maße.

Sehr wahrscheinlich, aber meines Wissens nicht bewiesen ist das Vorkommen analoger Nystagmuszuckungen bei Rotationen des Körpers um die Querachse des Kopfes.

Die hier besprochenen Nystagmen führen wie auch meistens der Nystagmus anderen Ursprungs nicht zu Scheinbewegungen der Gesichtsobjekte, sie werden subjektiv überhaupt nicht wahrgenommen (während sie objektiv am Auge eines anderen leicht zu sehen sind). Sie teilen diese Eigenschaft mit manchen willkürlichen Bewegungen von kleinem Betrage und großer Geschwindigkeit, wie sie z. B. beim Lesen stets ausgeführt werden. Vgl. über diesen Punkt unter anderen Holt[1]).

Sowohl horizontaler wie rotatorischer Nystagmus kommt auch bei Tieren vor. Außerdem gibt es bei Vögeln einen „Kopfnystagmus". Eine Taube, die, auf einer Drehscheibe sitzend, rotiert wird (etwa eine Umdrehung in 1 bis 2 Sekunden), zeigt dieses Pendeln des Kopfes aufs deutlichste, ebenso wenn man die Taube vor sich in den Händen hält (Kopf nach vorn, vom Experimentator abgewandt) und nun mit dem Tiere in den Händen sich langsam auf dem Absatze umdreht. Der Kopf bleibt dauernd um ein gewisses Maß in dem der Rotation entgegengesetzten Sinne abgelenkt und pendelt nun während des Drehens nystagmisch um diese Lage. In einem speziellen, von

[1]) Eye-Movement and Central Anaesthesia. Psychol. Rev. **4**, 1903; Harvard Psych. Studies **1**, 1903.

Ewald angegebenen Falle z. B. pendelte der Kopf in horizontaler Ebene zwischen einer Ablenkung von 95 und 120°. Ewald[1]) nennt in solchem Falle 120° den Reaktionsendwinkel, 25° die Nystagmusphase.

b) Nachbewegungen des ganzen Körpers nach Rotation.

Bei Besprechung des Drehschwindels wurde oben schon erwähnt, daß nach anhaltenden raschen Drehungen des Körpers um die Längsachse unter Umständen der Zwang besteht, die Drehung wider Willen in gleichem Sinne noch fortzusetzen. Bei manchen Menschen bedarf es dazu nur einer einzigen vollständigen Achsendrehung des Körpers, bei anderen tritt diese Erscheinung erst nach längerer Rotation auf. Sie ist sehr wohl zu unterscheiden von der durch das Trägheitsgesetz bedingten Nachwirkung einer Drehung. Hält man eine Person, die durch mehrere rasche Umdrehungen Drehschwindel bekommen hat, plötzlich für einen Augenblick fest und läßt sie dann los, so wirkt die vorausgegangene Drehung immer noch in der Weise nach, daß Tendenz zur Weiterdrehung besteht. Da die Reaktion hauptsächlich auf Kopf und Rumpf wirkt und keine geordneten aktiven Drehbewegungen mit Hilfe der Beine auslöst, kommt nur ein Taumeln zustande. Die Person fällt um, wenn sie sich nicht festhalten kann.

Auch bei Tieren haben die auf solche Weise ausgelösten Nachbewegungen in der Regel etwas Ungeordnetes, Taumelndes an sich, doch kommt es hier leichter zu wirklichen aktiven Nachrotationen um die vorherige Achse der passiven Drehung, einmal weil bei diesen Tierversuchen meist schnellere und längere Drehungen möglich sind, als man sie beim Menschen riskieren darf, dann aber auch deshalb, weil bei den meisten Tieren das Gleichgewicht des Körpers ein viel stabileres ist als beim Menschen, der im Schwindel einfach umfällt; Vierfüßer rutschen im gleichen Falle etwas ungeschickt in sogenannter Uhrzeigerbewegung auf dem Boden herum. Auch schwimmende Wirbeltiere zeigen die Nachbewegung nach Rotation: Froschlarven, die auf der Drehscheibe rotiert worden sind, schwimmen nachher mit heftigen Schwanzschlägen in kleinen Kreisen in der Drehrichtung herum, jedoch erst von dem Entwickelungsstadium an, in welchem das Labyrinth ausgebildet ist (Schaefer[2]). Bei wirbellosen Tieren ohne labyrinthähnliches Organ fehlen analoge Reaktionen gänzlich.

Auf manche Einzelheiten der hierher gehörigen Beobachtungen wird weiter unten bei den Erörterungen über den Auslösungsort des Drehschwindels zurückzukommen sein.

Anhaltende schnelle Rotationen des Körpers, sowohl aktive wie passive, versetzen den gesamten Nerven- und Muskelapparat des Körpers bei Mensch und Tier in einen Zustand der Unsicherheit und Schwäche, die Fähigkeit, Objekte zu fixieren, ist beeinträchtigt, das Binocularsehen ist gestört, es kann hochgradiges Übelbefinden und Erbrechen eintreten.

Die Achse der aktiven Nachdrehungen nach dem Aufhören passiver Rotation wird durch die Art der Anbringung des Tieres auf der Drehscheibe bestimmt. Das auf der Drehscheibe sitzende Kaninchen macht nachher, auf

---

[1]) Physiolog. Unters. ü. d. Endorgan d. *Nerv. octavus*. Wiesbaden 1892. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 7, 1 ff.

den Tisch gesetzt, Uhrzeigerbewegungen; das um die Körperlängsachse rotierte Tier rollt auch nachher um diese Achse (Mach). Die Analogie zu den oben S. 765 beschriebenen Erscheinungen des subjektiven Purkinjeschen Drehschwindels liegt auf der Hand; bestimmend ist in beiden Fällen die Lagerung des Kopfes zur Rotationsachse, nicht die des Rumpfes.

VI. Erfahrungen über die Funktionen des Labyrinths.

1. Historische und anatomische Vorbemerkungen.

Beobachtungen an Tieren waren es, die zuerst die Aufmerksamkeit auf die Beziehungen lenkten, die zwischen dem Ohrlabyrinth und der hier besprochenen Kategorie von Empfindungen heutzutage angenommen werden.

Flourens[1]) sah 1828, daß Verletzung und Reizung der halbzirkelförmigen Kanäle (Bogengänge) der Taube Zwangsbewegungen und Verdrehungen des Kopfes im Gefolge haben. Nach Durchschneidung eines oder beider horizontaler Bogengänge fand Flourens Pendelbewegungen des Kopfes in der horizontalen Ebene, bei Durchschneidung eines der vertikalen Gänge Bewegungen in dessen Ebene. Nach ausgedehnten Zerstörungen am Labyrinth mit Erhaltung der Schnecke erschien der Gehörssinn nicht geschädigt, wohl aber die Stabilität des ganzen Körpers, die Lokomotion war schwer geschädigt, das Fliegen unmöglich.

Das Tatsächliche von Flourens' Untersuchungen wurde bald von vielen Seiten bestätigt, doch deuteten die meisten Autoren zunächst die bei Verletzung der Bogengänge entstehenden Reizerscheinungen und Zwangsbewegungen als Ausdruck subjektiver Schalleindrücke[2]); andere[3]) dachten an direkt oder indirekt durch die Operation bewirkte Schädigung des Kleinhirns, dessen Beziehung zu Zwangsbewegungen man schon kannte.

In ein neues bedeutungsvolles Stadium trat die Forschung nach der Funktion der Bogengänge 1870 durch die Untersuchungen von Goltz[4]), der auf Grund seiner Versuche an Fröschen zu der Auffassung des Bogengangsystems als eines Sinnesorgans für das Gleichgewicht des Kopfes gelangte. Die Art, wie Goltz sich die Wirkungsweise der Bogengänge im einzelnen dachte, wurde bald durch Mach[5]) und Breuer[6]) als nicht zutreffend erkannt, und auch die Bezeichnung der Bogengänge als Organe des „Gleichgewichtssinns" kann heutzutage nicht widerspruchslos hingenommen werden. In der Hauptsache aber hatte Goltz unzweifelhaft recht, und das Verdienst, der Forschung den richtigen und späterhin so erfolgreichen Weg gewiesen zu haben, bleibt ihm unbestritten.

---

[1]) Expériences sur les canaux semicirculaires etc. Mém. de l'Acad. 9 (1828) und Compt. rend. Acad. scienc. 52, 673. — [2]) Diese Auffassung wurde auch noch in neuerer Zeit vertreten, so von Vulpian, Leçons sur la physiologie du système nerveux, Paris 1866, p. 600; von A. Tomascewicz, Diss., Zürich 1877; Laborde, Trav. Lab. physiol. Fac. méd., Paris 1885, p. 31; Preyer, Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. 40, 596. — [3]) Vgl. unter anderen: Bötticher, Arch. f. Ohrenheilk. 9, 1; Baginsky, Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1881 u. 1885. — [4]) Arch. f. d. ges. Physiol. 3, 172. — [5]) Sitzungsber. d. Wiener Akad. 68 (1873) u. 69. (1874). — [6]) Anzeiger d. k. k. Gesellsch. d. Ärzte, 1893, Nr. 7 u. Wiener med. Jahrb. 1874 u. 1875; Arch. f. d. ges. Physiol. 44, 135 und 68, 596.

Die Untersuchungen über die Funktion des Labyrinths, die sich an die Goltzsche Publikation anschlossen, zählen nach Hunderten und ihre Aufzählung an dieser Stelle erscheint daher ausgeschlossen. Abgesehen von etlichen Arbeiten, deren Ergebnis aus besonderen Gründen unten erwähnt werden muß, sei hier nur das Werk von Ewald [1]) über das Endorgan des *Nervus octavus* besonders genannt, in dem die sorgfältigen Untersuchungen dieses Forschers über die Funktion des Labyrinths hauptsächlich der Taube niedergelegt sind. Auch wer, wie ich, den Folgerungen Ewalds sich nicht in allen Punkten anschließen kann, wird doch die Bedeutung seiner mit großem Aufwand an Zeit und Mühe und mit glänzender Technik ausgeführten Versuche voll anerkennen. Die folgende Darstellung stützt sich denn auch in der Hauptsache auf die Angaben Ewalds.

Fig. 127.

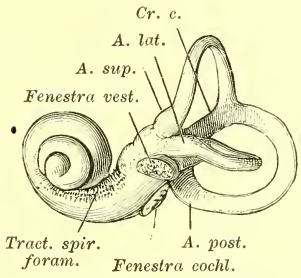


Fig. 128.

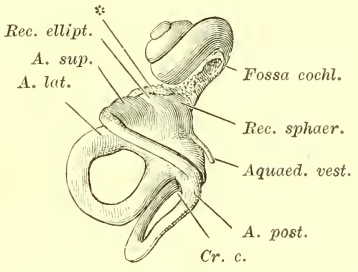


Fig. 127. Abguß des linken knöchernen Labyrinths von außen (aus Henle-Merkels Grundriß der Anatomie).

Fig. 128. Linkes knöchernes Labyrinth von oben. * Abgüsse der auf der *Pyramis vestibuli* mündenden Kanälchen. (Aus Henle-Merkels Grundriß der Anatomie.)

A. sup. Ampulle des oberen Bogenganges.

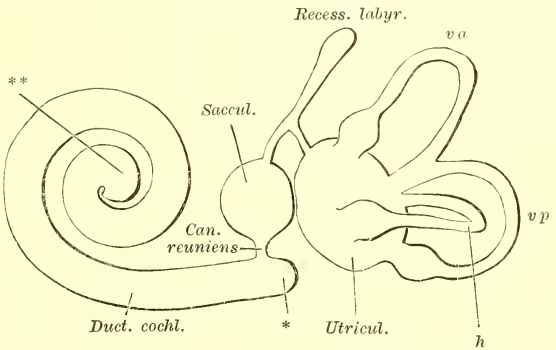
Cr. c. Gemeinsamer Schenkel des oberen und hinteren Bogenganges.

A. post. Ampulle des hinteren Bogenganges.

A. lat. Ampulle des äußeren Bogenganges.

Das häutige Labyrinth, das die Endigungen des *Ramus vestibularis Nervi acustici* enthält, liegt in einem im Felsenbein ausgesparten Hohlraume, dem knöchernen Labyrinth. Fig. 127 zeigt einen Abguß des linken knöchernen Labyrinths vom Menschen, vergrößert, von außen, Fig. 128 dasselbe von oben. Fig. 129 veranschaulicht die Gestalt des häutigen Labyrinths. Bei Tieren der höheren Wirbeltierklassen ist der Bau des Labyrinths demjenigen des Menschen sehr ähnlich.

Fig. 129.

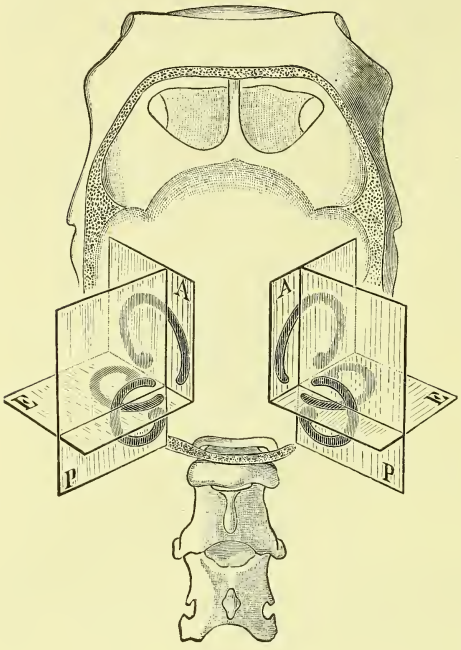


Linkes häutiges Labyrinth von außen. *va*, *vp* vorderer, hinterer Bogengang. *h* horizontaler Bogengang. * Vorhofsblindsack, ** Kuppelblindsack des *Ductus cochlearis*. (Aus Merkel, Topographische Anatomie).

[1]) R. Ewald, Physiologische Untersuchungen über das Endorgan des *Nervus octavus*. Wiesbaden (Bergmann) 1892.

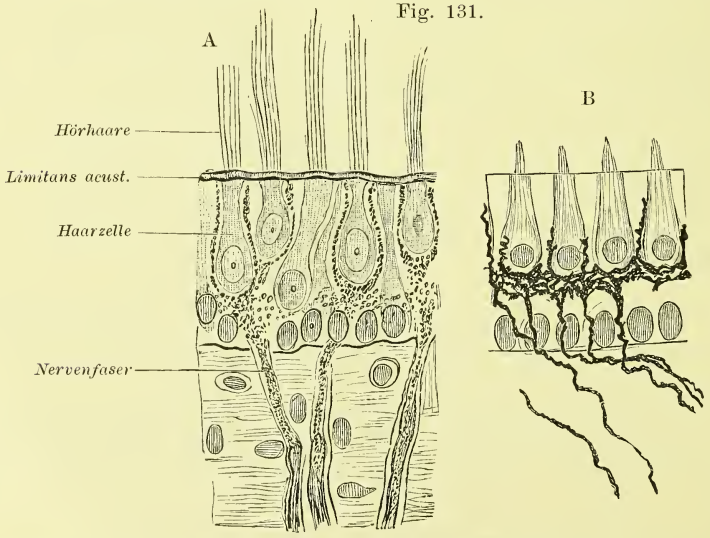
Aus der schematischen Fig. 130 ist die Orientierung der Bogengänge zueinander ersichtlich. Sie sind paarweise zusammengeordnet; rechts und links entsprechen sich je die horizontalen Bogengänge, die ihren Bogen nach außen kehren. Die beiden anderen Paare verlaufen nicht in frontaler und sagittaler Ebene, sondern zwischen beiden Richtungen etwa die Mitte haltend, und zwar so, daß der rechte vordere und der linke hintere etwa parallel verlaufen, ebenso der rechte hintere parallel dem linken vorderen. Die beiden vertikalen Bogengänge jeder Seite laufen mit ihrem hinteren Schenkel zusammen, so daß im Utriculus nur fünf statt sechs Einmündungsstellen vorhanden sind. An dem einen Ende besitzt jeder Kanal eine kugelige Erweiterung, die Ampulle, in welche ein das Sinnesepithel tragender Wulst so weit vorspringt, daß dieses nahezu in die Achse des Kanals zu stehen kommt. Das Sinnesepithel (Fig. 131) trägt lange, biegsame Haare von bei weitem

Fig. 130.



Schema der Bogengänge der Taube (nach Ewald). Man sieht von hinten in den geöffneten Schädel hinein. In der Ebene *A* liegt der *Canal. ant.*, in der Ebene *E* der *Canal. extern.*, in der Ebene *P* der *Canal. post.*

Fig. 131.



Sinnesepithel und Nervenendigungen in den Ampullen. A Osmiumsäurebehandlung, B Silberbehandlung. (Nach v. Lenhossék aus Henle-Merkels Grundriß der Anatomie.)

Fig. 1.

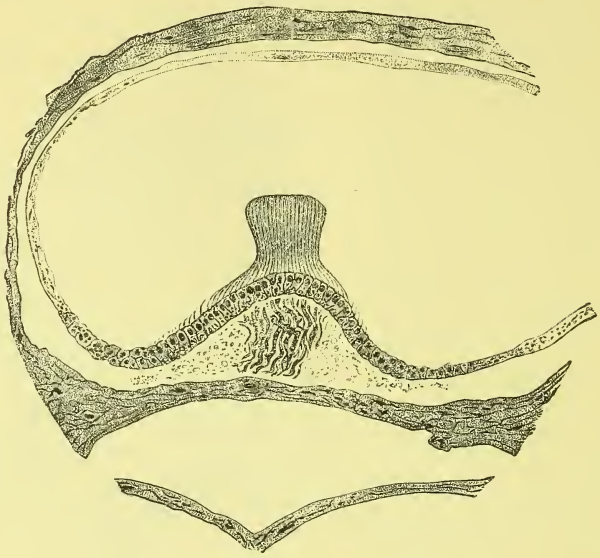


Fig. 2.

Fig. 1. Querschnitt der *Ampulla horizontalis (externa)* vom Zeisig. — Fig. 2. Querschnitt der *Ampulla sagittalis (superior)* von der Taube (nach Breuer).

größeren Dimensionen, als sie die gewöhnlichen Flimmerzellen aufweisen. Die Haare sind von einer schleimartigen oder gelatinösen Masse zusammengehalten, flottieren also nicht frei in der Endolymphe (vgl. Taf. II, Fig. 1 u. 2). Nicht selten findet man den ganzen Haarschopf stark auf die Seite gebogen, wie vom Winde umgelegte Halme. Bei jeder nicht ganz schonenden Präparation reißt das ganze aus Haaren und Schleimmasse bestehende Gebilde, die *Cupula terminalis*, vom Epithel ab. Näheres über den Bau der Cupula und des Epithels siehe bei G. Retzius, Biologische Untersuchungen **6** und bei J. Breuer, Sitzungsber. k. Akad. Wien, mathem.-naturw. Kl. **112** (3), 1903.

Geeignete Demonstrationspräparate der Cupula sind besonders leicht und schön vom Labyrinth des Hechtes zu gewinnen.

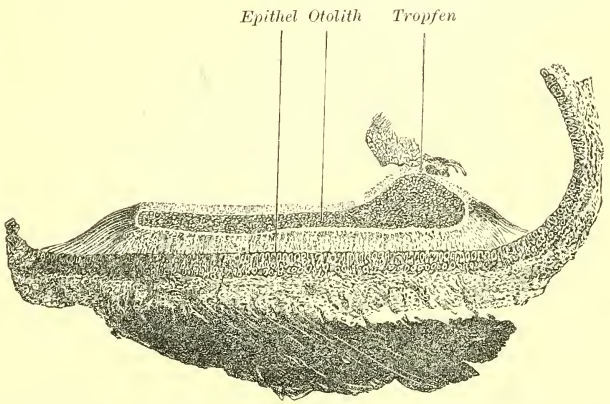
Die Nervenendorgane im Utriculus und Sacculus sind denjenigen der Ampullen ziemlich ähnlich gebaut. Jeder dieser beiden Labyrinthteile enthält eine sog. *Macula acustica*, zu der die Nerven treten. Die übrigen Wandteile sind nervenlos.

Das Epithel der Maculae trägt kürzere Haare als das der Cristae in den Ampullen. Ihre Spitzen sind wie bei diesen durch eine festere Masse zusammengebacken; diese Masse (Otoconium) besteht aber hier aus den sog. Otolithen, mikroskopischen Kristallen von kohlensaurem Kalk.

Da die Maculae und Cristae mit dem Hören sehr wahrscheinlich nichts zu tun haben, kann die Bezeichnung *M.* u. *C.* „*acustica*“ nur noch historische Bedeutung haben. Verworn hat den Vorschlag gemacht, die „Otolithen“ der höheren wie niederen Tiere nunmehr „Statolithen“ zu nennen, eine Änderung, die ich indessen nicht eigentlich notwendig finde, da durch den Stamm „Oto“ noch keineswegs die Beziehung zum „Hören“ gegeben ist.

Fig. 132 gibt ein Bild von dem Otolithenorgan der *Macula utriculi* von der Taube. Auf der Otolithenmasse sieht man einen schleimartigen Tropfen, der nach Breuers neueren Untersuchungen durch Schleimfäden mit der Utriculuswand zusammenhängt und offenbar von dort aus erneuert und erhalten wird.

Fig. 132.



Querschnitt durch die *Macula utriculi* in der Ebene des Frontalkanals (nach J. Breuer).

Über die Anordnung der Otoconien im Raume wird weiter unten noch zu sprechen sein.

Detaillierte Angaben über Bau und Anordnung der Sinnesepithelien sowohl in den Ampullen wie im Utriculus und Sacculus finden sich bei Breuer in dessen Arbeit aus dem Jahre 1903 (Sitzungsber. k. Akad. d. Wissensch. Wien; mathem.-naturw. Kl. **112**, III).

2. Die Wirkung des Labyrinthverlustes bei Tieren.

Die Analyse der Funktion des Labyrinths geht am zweckmäßigsten von der Beobachtung der Erscheinungen aus, die man an Tieren nach Entfernung des Labyrinths beobachtet; wir folgen hierin der Beschreibung von R. Ewald, die ich, soweit ich sie nachgeprüft habe, durchaus bestätigen kann. Auch von anderer Seite liegen mehrfach Bestätigungen vor. Einzelne Abweichungen s. u.

Das Verhalten von Tauben nach beiderseitiger völliger Entfernung des häutigen Labyrinths. Hervorzuheben ist zunächst, daß die Wirkungen der Operation anfangs sehr auffallende und deutliche sind, daß sie aber im Laufe einiger Monate so weit zurückgehen, daß sie nur bei spezieller Prüfung bestimmter Funktionen deutlich zum Ausdruck kommen. Am interessantesten sind natürlich die dauernden Ausfallserscheinungen.

Die labyrinthlosen Tauben gehen in normaler Weise, ohne jede eigentliche ataktische Störung. Die Bewegungslust ist entschieden vermindert, doch tritt zeitweise eine gewisse Unruhe und Hast in den lokomotorischen und sonstigen Bewegungen hervor. Die Muskeln zeigen sämtlich eine abnorme Schlaffheit und die Gliedmaßen daher eine auffallende Beweglichkeit. Die „grobe Kraft" der Muskulatur ist entschieden vermindert, wie man bei den verschiedensten Versuchen bemerkt. Ein 40 g schwerer Ring beispielsweise, der um den Hals der Taube gelegt ist, zieht bald den Kopf nach unten, während eine nicht operierte Taube dieses Gewicht leicht trägt. Eine 20 g schwere Bleikugel, die mit einem Faden am Schnabel des Tieres befestigt ist, zieht den Kopf stark nach unten. Fällt die Kugel bei den Bewegungen des Tieres nach hinten auf den Rücken, so wird der Kopf in stark rückwärts gebeugter Stellung durch das Gewicht fixiert; eine normale Taube überwindet das Gewicht mit Leichtigkeit. Der (unbeschwerte) Kopf wird, namentlich wenn die Augen verdeckt sind, etwas nach hinten übergebeugt gehalten. Die labyrinthlosen Tauben können nicht mehr fliegen, sie flattern nur kraftlos und ungeschickt auf kurze Strecken; dabei sind die Flugbewegungen wohl koordinierte. Dennoch ist der Flug entschieden schlechter als bei einer Taube ohne Großhirn [1]), die kraftvollere Bewegungen macht und beim Niederfliegen normal auf den Boden auffliegt, während die labyrinthlose Taube mit dem Rumpfe heftig auf den Boden aufschlägt. Anderseits fliegt die großhirnlose Taube nur, wenn sie in die Luft geworfen wird, die labyrinthlose dagegen versucht den Flug auch zuweilen spontan. Die labyrinthlose Taube kann anfangs nicht selbständig fressen, lernt es aber bei geeigneter Behandlung mit der Zeit wieder.

Daß die Taube ohne Labyrinth noch hören sollte, ist eine Angabe Ewalds, die wohl von den meisten Autoren auf irrige Deutung seiner Versuche zurückgeführt wird. Erörterung dieser Frage erübrigt sich hier.

Die Störungen nach nur einseitiger Entfernung des Labyrinths sind von anderer Art. Sie verlieren sich übrigens nach einigen Wochen oder Monaten wieder völlig. Die Tiere können fliegen und selbständig fressen.

---

[1]) Diesen Unterschied speziell habe ich stets nachweisbar und besonders bemerkenswert gefunden.

Sind aber seit der einseitigen Operation erst wenige Tage vergangen, so sieht man der Taube die Störungen sogleich an. Sie schwankt beim Gang, fällt nicht selten um. Es entwickelt sich dann eine immer deutlicher werdende Kopfverdrehung, die bei sehenden Tieren in Anfällen von verschiedener Dauer auftritt, bei blinden Tauben dauernd wird. Stets wird der Kopf nach der operierten Seite hin geneigt. Die Drehung kann so weit gehen, daß der Scheitel nach unten kommt. Die verschiedenartigsten Reize lösen die Verdrehungsanfälle aus. Wird nun während dieses Stadiums auch das zweite Labyrinth entfernt, so bleiben die Verdrehungsanfälle sofort aus.

Prüft man, wie schwere Gewichte an das Bein einer Taube gehängt werden müssen, um das Bein passiv zu strecken, so findet man das Bein der labyrinthlosen Seite durch erheblich geringere Gewichte streckbar. An den Füßen aufgehängt, zeigt sich eine einseitig operierte Taube ebenfalls schwächer als eine normale, die sich aufzurichten und in die Höhe zu fliegen vermag, soweit es der Faden gestattet.

Eine gewisse Muskelschwäche scheint bei einseitiger Operation dauernd bestehen zu bleiben, die Kopfverdrehungen indessen verlieren sich mit der Zeit völlig.

Bei Säugetieren gelingt die Entfernung des ganzen Labyrinths lange nicht mit solcher Reinlichkeit und Eleganz wie bei Vögeln, und auch die an ihrer Stelle vielfach versuchte Durchschneidung des *Nervus acusticus* ist nicht ohne so tiefgreifende Schädigungen anderer Teile ausführbar, daß man vertrauen könnte, hier rein nur die Wirkung des Labyrinthausfalls vor sich zu haben. Ich verzichte daher auf die Beschreibung der nach solchen Operationen gemachten Beobachtungen und werde sie nur weiter unten bei einigen speziellen Fragen zu erwähnen haben.

Sehr leicht gelingt dagegen die Entfernung des ganzen Labyrinths ohne nennenswerte Nebenverletzungen bei Fröschen nach einer von Schrader[1]) angegebenen Methode, bei der man von der Mundhöhle aus das Felsenbein anbohrt, um das Labyrinth mit einem Häkchen herauszuholen. Die Ausführung der Operation am Frosch, die in wenigen Minuten gemacht werden kann, empfiehlt sich zu Demonstrationszwecken ganz besonders; wenn auch die Erscheinungen bei den niedriger organisierten Tieren weniger mannigfaltig sind als bei Vögeln, so stimmen sie doch im Prinzip mit den oben beschriebenen überein und führen zu den gleichen theoretischen Schlüssen wie jene.

Auch der beiderseitig labyrinthlose Frosch zeigt eine deutliche Muskelschwäche. Nimmt man ihn in die Hand, so fühlt man die Kraftlosigkeit seiner Befreiungsversuche. Er sitzt meist platter, zusammengesunken da, hebt den Kopf fast nie so in die Höhe, wie es ein gesunder Frosch oft lange Zeit hintereinander tut. Er springt viel seltener, wenn er nicht irgendwie gereizt wird. Der Sprung ist schwächer und sieht häufig ganz seltsam ungeschickt aus; zuweilen springt der Frosch fast senkrecht in die Höhe, wie es der normale nie tut. Dabei überschlägt er sich häufig und fällt nun mit dem Rücken nach unten auf den Boden, was beim gesunden Tier ebenfalls nie geschieht. Auch richtet sich der labyrinthlose Frosch lange nicht so schnell und sicher wieder auf, wenn er auf den Rücken gelegt wird. Ist er

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **41**, 75.

durch einige Sprünge ermüdet, so bleibt er auch wohl lange Zeit auf dem Rücken liegen.

Sehr auffallend zeigt sich die Abnormität im Wasser. Auch hier fällt zunächst die Muskelschwäche auf; alle Bewegungen sind schlaffer und energieloser als in der Norm. Setzt man einen labyrinthlosen Frosch auf die Hand und taucht diese langsam ins Wasser, bis der Frosch untergetaucht ist, und zieht nun vorsichtig die Hand unter dem Tiere weg, so sinkt dieses nicht selten wie leblos zum Grunde, unter Beibehaltung seiner vorigen sitzenden Stellung. Wirft man das Tier dagegen ins Wasser, so macht es Schwimmbewegungen, bei denen aber ein mattes Strampeln mit beiden Beinen abwechselnd viel häufiger beobachtet wird als beim normalen Frosche. Zwischendurch sieht man dann auch wieder etliche kräftige koordinierte Schwimmstöße mit beiden Beinen gleichzeitig. Dabei ist die Haltung des Körpers im allgemeinen die normale. Doch sieht man zuweilen, was beim normalen Frosch nie vorkommt, eine Achsendrehung des Tieres, durch die für einen Augenblick die Bauchseite nach oben kommt. Daß ein Frosch eine etwas längere Strecke mit dem Bauch nach oben schwimmt, kommt spontan, soweit ich gesehen habe, nur bei ermüdeten Tieren vor, bei diesen aber sowohl gleich nach der Operation wie auch viele Wochen später. Überhaupt bleiben die hier erwähnten Erscheinungen lange, vielleicht dauernd bestehen.

Läßt man einen labyrinthlosen Frosch mit dem Bauch nach oben sacht ins Wasser fallen, so kann man meistens einige Schwimmbewegungen in dieser abnormen Lage beobachten.

Nach einseitiger Labyrinthentfernung sind die Erscheinungen der Muskelschwäche nur angedeutet. Ein solcher Frosch bleibt auch nicht auf dem Rücken liegen, schwimmt auch nicht auf dem Rücken. Dagegen überschlägt er sich ebenfalls häufig beim Sprung und springt fast stets in krummer Bahn. Das am meisten in die Augen fallende Symptom ist die Kopfverdrehung, die sofort nach der Operation einsetzt und nicht nur wie bei der Taube anfallsweise besteht, sondern anhaltend (der Kopf wird auf der labyrinthlosen Seite tiefer gehalten).

Im Wasser sinkt der Frosch mit der operierten Seite tiefer hinab, die Extremitäten der operierten Seite hängen schlaffer.

Weitere Einzelheiten bezüglich des Verhaltens einseitig oder doppelseitig operierter Tiere s. unter anderen bei Ewald (l. c.). Über die Wirkung der Zerstörung und der Reizung einzelner Bogengänge s. u. S. 786 ff.

3. Die Labyrinthreflexe.

Die oben erwähnten, bei Bewegungen des Rumpfes und Kopfes eintretenden Reflexbewegungen werden großenteils im Labyrinth ausgelöst.

Die kompensatorischen Augenbewegungen und Kopfbewegungen verschwinden, sobald das Labyrinth zerstört oder der Acusticus durchschnitten ist. Bei Kaninchen, denen der Acusticus von der Paukenhöhle aus zerstört ist, hören die Raddrehungen des Auges, durch welche aktive und passive Kopfbewegungen um die Querachse großenteils kompensiert werden, sofort auf, wenn die Operation beiderseitig ausgeführt ist. Bei Fröschen fallen die Augen- und Kopfbewegungen weg, durch die passive Körperbewegungen teil-

weise kompensiert werden. Der normale Frosch, auf dem Froschbrett aufgebunden, hebt den Kopf, wenn man das Brett um die Querachse des Tieres langsam so dreht, daß das Kopfende des Tieres sich senkt, d. h. er kompensiert die Drehung zu einem gewissen Bruchteil. Gleichzeitig rotieren die Augen so, daß auch hierdurch der Verlagerung des Netzhauthorizontes entgegengewirkt wird. Nichts von diesen Erscheinungen zeigt der labyrinthlose Frosch. Er bewegt Kopf und Augen mit der Unterlage, auf der er befestigt ist, ohne irgend eine Reaktionsbewegung. Auch bei Fischen hebt Labyrinthzerstörung die kompensatorischen Augenbewegungen auf. Loeb[1]) fand dies bezüglich der kompensatorischen Hebungen und Senkungen der Blicklinie bei Drehungen des Fisches (Scyllium) um seine Längsachse. Ich habe die kompensatorischen Rollungen bei Süßwasserfischen in gleicher Weise vom Labyrinth abhängig gefunden.

Schlangen, Blindschleichen und Eidechsen, die man in der Mitte des Körpers faßt, pflegen den Kopf horizontal zu halten, gleichviel, wie man den Körper hält und bewegt. Da sie dies auch bei verklebten Augen noch tun, ist es sehr wahrscheinlich, daß auch hier das Labyrinth als Auslösungsort für den Reflex funktioniert, wobei die Schwerkraft in der unten noch näher zu besprechenden Weise als Reiz wirkt.

Auch bei Vögeln dürfte das Labyrinth die gleiche Funktion haben, und auf Labyrinthreflexen wird es wohl zum größten Teil beruhen, wenn z. B. Eulen, die, am Rumpfe gehalten, in verschiedene Lagen gebracht werden, den Kopf fast stets in derselben Lage halten, in der er auch bei aufrechter Rumpfhaltung steht, d. h. den Scheitel oben. Bei Tauben allerdings scheint nach Ewalds Beobachtungen für die Auslösung der kompensatorischen Kopfbewegungen auch der Gesichtssinn eine nicht unwichtige Rolle zu spielen. Die kompensatorischen Raddrehungen des menschlichen Auges aber sind von den Gesichtseindrücken gänzlich unabhängig und unzweifelhaft vom Labyrinth beherrscht (Breuer). Sie fehlen auch bei Blinden nicht. Daß sie nicht etwa als assoziierte Mitbewegungen aufzufassen sind, geht schon daraus hervor, daß sie auch ohne jede aktive Tätigkeit der Rumpf- und Extremitätenmuskulatur auftreten, wenn der Körper unbeweglich auf einem Brett befestigt ist und mit diesem um eine sagittale Achse gedreht wird.

Der Augen- und Kopfnystagmus (s. o. S. 775) fehlt bei Tieren ohne Labyrinth vollständig, wie besonders überzeugend Ewald an Tauben gezeigt hat. Um alle nystagmischen Bewegungen des Kopfes zu beseitigen, müssen allerdings die Augen exstirpiert oder verschlossen sein, oder es muß dafür gesorgt sein, daß die sämtlichen im Gesichtsfelde des Tieres befindlichen Objekte mit rotieren. Der Behauptung v. Cyons[2]), der Nystagmus wie überhaupt die Reaktionen auf der Drehscheibe würden durch die Verschiebung der Gesichtsobjekte bewirkt, weil Frösche mit Dunkelkappe sie (häufig) nicht mehr zeigen, ist durch Breuer[3]) und mich[4]) widersprochen worden. Das Überziehen einer Dunkelkappe hemmt allerdings diese wie auch andere Reflexe, dasselbe tun aber auch beliebige andere sensible Reize, wie z. B. das feste Umschnüren eines Beines.

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **49**, 175, 1891. — [2]) Arch. f. Physiol. 1897, S. 29 bis 111. — [3]) Arch. f. d. ges. Physiol. **68**, 596. — [4]) Ztschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **16**, 392.

4. Der Labyrinthtonus.

Es ist das Verdienst R. Ewalds, zuerst mit Nachdruck darauf hingewiesen zu haben, daß ein großer Teil der Störungen und Anomalien, die man an labyrinthlosen Tieren beobachtet, auf Schwäche und Atonie der Muskulatur beruht, die unmittelbar nach der beiderseitigen Entfernung des Labyrinths einsetzt. Es wurde oben schon auf einige dieser Erscheinungen hingewiesen; hier sei noch kurz erinnert an die Schlaffheit der Glieder des Frosches und an die ähnlichen Schwächeerscheinungen bei Tauben, die sich namentlich beim Flug bemerkbar machen. Ewald gibt (l. c.) noch eine ganze Anzahl spezieller Versuche an, durch die die Schwäche der verschiedenen Muskelgruppen nachgewiesen werden kann. Auch beim Hunde fand er Ähnliches.

Außer der Schädigung der groben Kraft und der Herabsetzung des Tonus bemerkt man an den Muskelaktionen einen Mangel an Präzision, der nach Erfahrungen der allgemeinen Muskelphysiologie mit der Tonusverminderung unschwer in Verbindung zu setzen sein dürfte. Ewald nimmt an, daß jedes Labyrinth mit jedem Muskel des Körpers in Beziehung steht und den Tonus der Gesamtmuskulatur beherrscht, daß aber die Beziehungen zu den einzelnen Muskelgruppen sehr ungleich nahe sind; bei den einzelnen Tierarten dürften diese Verhältnisse erheblich wechseln. Ewald[1]) hat nachgewiesen, daß die Totenstarre bei Tieren später auf der Seite mit zerstörtem Labyrinth als auf der anderen eintritt.

Nach allen diesen Erfahrungen stellt sich also der Einfluß des Labyrinths auf die Muskulatur sehr ähnlich demjenigen dar, den die Gesamtheit der centripetalen Nerven überhaupt ausübt, und die Wirkung der Labyrinthentfernung ähnelt in den von Ewald besonders hervorgehobenen Punkten der Wirkung, die man bei der Durchschneidung der hinteren Rückenmarkswurzeln beobachtet. Man kann gewiß von einem speziellen „Labyrinthtonus“ oder, wie Ewald sagt, „Ohrtonus“ sprechen, wird diesen aber nur als einen besonderen Fall des Reflextonus überhaupt auffassen müssen. Recht zweifelhaft erscheint es mir, ob es zweckmäßig ist, mit Ewald am Labyrinth die zwei von den beiden Hauptästen des Acusticus versorgten Teile als Hörlabyrinth (Schnecke) und Tonuslabyrinth (übrige Abschnitte des Labyrinths) zu unterscheiden. Es würde hiermit die Bedeutung der Bogengänge und der übrigen Endorgane des *Ramus vestibularis* für die Tonuserhaltung in einer einseitigen und den Tatsachen doch nicht hinreichend entsprechenden Weise in den Vordergrund gestellt werden.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß der Labyrinthtonus durch Vermittelung des Kleinhirns zustande kommt, dessen enger funktioneller Zusammenhang mit dem Labyrinth einerseits, dem gesamten Muskelsystem anderseits außer Zweifel steht; vgl. hierzu unten S. 804 ff.

5. Die Wirkung der Ausschaltung und Reizung einzelner Bogengänge.

Bei Vögeln gelingt es verhältnismäßig leicht, einen einzelnen Bogengang außer Funktion zu setzen oder zu reizen. Die Folgen der Verletzung eines

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **63**, 521, 1896.

einzelnen Bogenganges gehören zu denjenigen Erscheinungen, die schon Flourens beobachtet hatte, als er zum erstenmal die Aufmerksamkeit auf die eigenartigen Funktionen des Labyrinths lenkte. Um rein zu experimentieren, muß man entweder zunächst den Blutsinus entfernen, der an jedem Bogengang entlang läuft, oder unter Schonung dieses Sinus den knöchernen Kanal eröffnen. Das eleganteste Verfahren hat Ewald angegeben, der in den angebohrten knöchernen Kanal Plombierungsmasse eintreibt, die den häutigen Kanal auf eine längere Strecke komprimiert und veröden läßt, so daß man späterhin den ganzen Kanal durchschneiden oder herausnehmen kann, ohne ein Tröpfchen der Endolymphe zu verlieren oder auch nur das häutige Labyrinth zu eröffnen.

Die auf die eine oder andere Weise bewirkte Zerstörung eines Bogenganges hat, abgesehen von den während der Operation auftretenden Reizerscheinungen (s. u.) so gut wie gar keine Wirkung auf das Verhalten eines Tieres, um so weniger, je reiner, d. h. mit je weniger Nebenverletzungen gearbeitet wird. Merkliche Störungen treten dagegen auf, wenn auch der in derselben Ebene orientierte Kanal der anderen Seite ausgeschaltet ist. Die auffallendste Wirkung dieser Operation ist ein häufig auftretendes und oft lange anhaltendes Hin- und Herpendeln des Kopfes in der Ebene der zerstörten Kanäle. Bei der Lokomotion der Tiere (Tauben) kommt es leicht zu Kreis- und Rundbahnbewegungen.

C. J. König [1]) fand und Breuer [2]) bestätigte, daß dieselbe Wirkung wie durch Plombierung der Gänge auch durch Einbringung von Cokain in die Perilymphräume erzielt werden kann.

Erfolgreiche mechanische Reizung einzelner Bogengänge hat zuerst (1875) Breuer erzielt. Ewald hat die Methodik vervollkommnet und interessante neue Versuche ausgeführt. Zerrung oder Durchschneidung eines Bogenganges hat die unmittelbare Folge, daß der Kopf nach der anderen Seite gewendet wird; kurze Zeit danach kehrt sich dann die Bewegung um (Breuer). Ähnlich wirkt der chemische und osmotische Reiz, der beim Einbringen eines Kristalles von Salz u. dgl. in den Bogengang zustande kommt. Auch das Cokain wirkt zunächst in dieser Weise reizend durch Wasserentziehung. Alle diese Reize wirken nur dadurch, daß sich ihre Wirkung bis auf die Ampulle erstreckt, während der nervenlose Bogengang selbst nicht reizbar ist, wie besonders klar Ewald zeigte.

Wird der knöcherne Kanal an einer beliebigen Stelle eröffnet und nun durch eine in das Loch gesteckte Borste oder Nadel auf den häutigen Kanal ein Druck oder Stoß ausgeübt, so tritt alsbald eine einmalige Pendelbewegung des Kopfes in der Ebene des betreffenden Kanals auf.

Die gleiche Wirkung erzielte Ewald durch eine am Kopf der Taube angekittete winzige Hammervorrichtung, die pneumatisch betrieben wird, also auch auf größere Distanz in Tätigkeit gesetzt werden kann. Auch durch kleine an den eröffneten Kanal angesetzte Schläuche kann eine künstliche Strömung der Endolymphe erzeugt werden.

---

[1]) Contribution à l'étude expérimentale des canaux semicirculaires. Thèse, Paris 1897. — [2]) Sitzungsber. Wiener Akad. d. Wissensch., mathem.-naturw. Kl., **112** (1903).

Alle diese Reizungen versagen, wenn die betreffende Ampulle durch Cokain anästhesiert ist.

Auch durch elektrischen Reiz können die einzelnen Ampullen erregt werden (Breuer[1]), und sie lösen dann Kopfbewegungen in der Ebene des betreffenden Kanals aus. Die isolierte Reizung gelingt nur bei Anwendung besonderer Vorsichtsmaßregeln, während man die diffuse Erregung eines Labyrinths leicht erhält, wenn man nur die eine Elektrode an das freigelegte Labyrinth anlegt. Die Folge dieser diffusen Erregung ist die von Breuer so genannte „galvanotropische Reaktion", bestehend in einer Neigung des Kopfes zur Anode hin. Derartige Reaktionen sind bei sehr vielen Tieren, auch Säugetieren, leicht hervorzurufen, und sie entsprechen durchaus den auch beim Menschen erzielten. Für isolierte Reizung einzelner Ampullen eignen sich am besten Tauben. Die galvanotropische Reaktion tritt schon bei sehr geringen Stromstärken deutlich auf (0,05 Milliamp. nach Jensen, Arch. f. d. ges. Physiol. **64**, 218), die durch isolierte Reizung der *Ampulla externa* erzeugte Kopfwendung erst bei wesentlich stärkeren Strömen. Weitere Einzelheiten über diese Versuche s. bei Breuer (1903).

6. Störungen der Bewegungs- und Lageempfindungen als Folge von Labyrintherkrankungen.

Die Erfahrungen aus der Pathologie des Labyrinths beim Menschen können an dieser Stelle nicht übergangen werden, wenigstens insoweit sie uns wichtige Ergänzungen zu den physiologischen Beobachtungen ergeben.

Als Menière sche Krankheit[2]) bezeichnet man einen Symptomenkomplex, der so ziemlich dem entspricht, was man nach den Erfahrungen an Tieren mit lädiertem Labyrinth bei einem Menschen erwarten müßte, dessen Labyrinth krank ist. Außer Schwerhörigkeit bzw. Taubheit und störenden subjektiven Geräuschen beobachtet man starken Schwindel, Zwangsbewegungen, unsicheres Gehen und Stehen, bei höheren Graden auch Erbrechen und Ohnmacht. Blutungen oder Entzündungen im Labyrinth stellen sich als Ursache dieses Symptomenkomplexes heraus, der übrigens in sehr ähnlicher Weise auch bei entzündlichen und geschwulstigen Prozessen auftritt, die den Acusticusstamm schädigen. Zu bedenken ist, daß in allen diesen Fällen das dem Labyrinth und dem Acusticusstamme so nahe liegende Kleinhirn von diesen Affektionen leicht mit betroffen wird und daß Kleinhirnerkrankungen sehr ähnliche Erscheinungen bewirken können wie Labyrintherkrankungen. Näheres hierüber s. in der klinischen Literatur.

Interessanter, weil vom physiologischen Standpunkte besser verwertbar, sind die chronischen Affektionen des Labyrinths, die zur Taubstummheit führen, wenn sie in früher Kindheit auftreten. Auch angeborene Defekte des Labyrinths mit gleicher Wirkung kommen vor. Allerdings findet man nicht bei allen Taubstummen Labyrinthaffektionen. Mygind[3]) hat die Labyrinthe von 118 Taubstummen bei der Sektion untersucht und bei 80 derselben (67 Proz.) pathologische Veränderungen gefunden. Vestibulum und Schnecke

---

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **44**, 145 (1888) u. Sitzungsber. Wien. Akad. **112**, 49 (1903). — [2]) Gaz. méd. de Paris 1861. — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. **30**, 76.

waren etwa gleich häufig Sitz der Erkrankung (je 40 Proz.). Die Bogengänge waren in etwa 56 Proz. der Fälle ergriffen. Es ist nun sehr bemerkenswert, daß auch durchaus nicht alle Taubstummen Anomalien im Gebiete der Bewegungs- und Lageempfindungen aufweisen und daß ebenfalls die Reflexe, die man neuerdings mit dem Labyrinth in Zusammenhang bringt, nur bei einem Teil der Taubstummen fehlen oder merklich geschwächt sind. So vermißte Kreidl[1]) den horizontalen Augennystagmus bei passiver Drehung um die Vertikalachse in etwa 50 Proz. seiner Fälle von Taubstummheit (109 Fälle wurden untersucht). Bei einer weiteren (kleinen) Zahl von Fällen (etwa 18 Proz.) war der Nystagmus subnormal oder ganz geringfügig.

Bei anderen Versuchen, in denen Kreidl annähernd die Bedingungen des oben erwähnten Machschen Versuches mit Karussellbewegung einhielt, verfielen 21 Proz. der Taubstummen nicht in die bei Normalen unvermeidliche Täuschung über die Orientierung zur Vertikalen. Es waren das sämtlich solche, die auch keinen Drehnystagmus hatten. Ein erheblicher Prozentsatz dieser Kranken zeigte auch gestörte Lokomotion, namentlich bei geschlossenen Augen, sie konnten meistens nicht mit geschlossenen Augen auf einem Beine stehen.

James[2]), der zuerst die Aufmerksamkeit auf die Orientierungsstörungen der Taubstummen gelenkt hat, fand, wie schon oben erwähnt, unter 25 Taubstummen 15, die, unter Wasser tauchend, völlig die Orientierung verloren, den Boden des Bassins und dessen Wände nicht mehr unterscheiden konnten und nicht wußten, in welcher Richtung sie sich zu bewegen hatten, um die Oberfläche zu erreichen, während sie derartige Störungen nicht hatten, wenn sie den Kopf über Wasser behielten.

Ferner konstatierte James, daß von 519 Taubstummen 186 bei rascher Rotation um die Vertikalachse nicht schwindlig wurden, während von 200 Gesunden 199 Schwindel bekamen[3]). Jene 15, die beim Tauchen desorientiert wurden, gehörten alle zu den schwindelfreien.

Daß diese verschiedenen Störungen der Empfindung wie der Reflexe nicht gleich häufig und nicht immer alle zusammen gefunden werden, erklärt sich nach der weiter unten auseinanderzusetzenden theoretischen Auffassung dieser Störungen sehr einfach daraus, daß ein Teil derselben auf Defekten der Otolithenapparate im Labyrinth, ein anderer auf Schädigung der Bogengänge beruhen dürfte. Diese beiden Affektionen aber treten nicht stets zusammen auf, sondern die Bogengänge sind, wie aus der oben erwähnten Statistik von Mygind hervorgeht, häufiger erkrankt als die Otholitenapparate.

---

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **51**, 119. — [2]) Americ. Journ. of otology 1887. — [3]) Nach passiver Rotation verhält sich also der normale Mensch zum schwindelfreien Taubstummen gewissermaßen wie in Tyndalls hübschem Versuch das rohe Ei zum gekochten: das rohe Ei, auf der Tischplatte zur Rotation gebracht, dreht sich, wenn man es auf einen Augenblick angehalten hat, sofort wieder weiter, während das gekochte Ei stets ruhig liegen bleibt, wenn die Rotation einmal unterbrochen war. — So irreführend dieser Vergleich sein kann, so anschaulich und belehrend kann er in richtiger Beleuchtung sein. Er versinnbildlicht die Rotationsremanenz im flüssigen Labyrinthinhalt.

VII. Theoretisches über die Funktionen des Labyrinths.

1. Die Mach-Breuersche Theorie [1]).

Bis zum Jahre 1870 betrachtete man das gesamte häutige Labyrinth als Sitz des Gehörssinns. Da man über die Funktion der Schnecke schon spezielle Theorien hatte und sie als das Gehörsorgan κατ' ἐξοχήν auffaßte, mußte man für die „Maculae acusticae" des Utriculus und Sacculus mit ihren Otolithen sowie für die halbzirkelförmigen Kanäle Spezialfunktionen ersinnen; die auf beweglichen Haaren schwebenden Otolithen schienen ebenso wie die Gehörsteine in den Otocysten wirbelloser Tiere besonders geeignet, bei Schalleinwirkungen in Schwingung zu geraten und dabei die darunter liegenden Nervenendigungen mit Hilfe der Haare zu erregen. Da die Perception der Töne verschiedener Höhe schon an die Schnecke vergeben war, blieb für den Otolithenapparat die Wahrnehmung der Geräusche als Domäne vorbehalten.

Die Bogengänge, deren Anordnung in den drei Dimensionen des Raumes längst bekannt und aufgefallen war, sollten nach einer ziemlich verbreiteten Ansicht zur Perception der Schallrichtung dienen.

Es ist heutzutage nicht ganz leicht zu verstehen, wie so wenig plausible Hypothesen, namentlich diejenige bezüglich der Otolithen, so lange Zeit ruhig hingenommen werden konnten. Es zeigt sich hierin wieder zum Teil wenigstens eine der ungünstigen Wirkungen der J. Müllerschen Lehre von den spezifischen Sinnesenergien. Die Sinnesepithelien des Labyrinths hängen allesamt mit dem *Nervus acusticus* zusammen, also müssen sie allesamt spezifische Gehörsempfindung vermitteln; das war der verhängnisvolle Fehlschluß. Preyer [2]) versuchte die Gehörsfunktionen der Bogengänge zu retten durch die Annahme, daß es die spezifische Energie der Ampullennerven sei, „ein mit Schall verbundenes Raumgefühl zu geben, und zwar ein Richtungsgefühl".

Die Zahl derer, die noch jetzt an akustische Funktion der Otolithenapparate und der Bogengänge glauben, dürfte sehr klein sein. Erwähnt sei indessen, daß noch ganz neuerdings Hensen [3]) gegen die neue, auch von mir in diesem Werke vertretenen Auffassung des Labyrinths aufgetreten ist; seine Gegengründe dürften indessen durch die neuesten Darlegungen Breuers [4]) entscheidend widerlegt sein.

Wie schon oben erwähnt wurde, hat zuerst Goltz [5]) das Labyrinth, speziell die Bogengänge als eine Vorrichtung bezeichnet, die zur Erhaltung des Gleichgewichtes dient. „Sie sind sozusagen Sinnesorgane für das Gleichgewicht des Kopfes und mittelbar des ganzen Körpers."

---

[1]) Die hier als Mach-Breuersche Theorie bezeichnete Auffassung der Labyrinthfunktion wurde, wie ich ausdrücklich bemerken möchte, fast gleichzeitig mit den genannten Autoren auch von Crum Brown veröffentlicht. Da indessen die eingehende Begründung und namentlich die sich bald als notwendig erweisende Modifikation der Theorie nur von Mach und Breuer herrührt, scheint mir die Bezeichnung der Theorie als Mach-Breuersche, unbeschadet der Verdienste Crum Browns, doch gerechtfertigt. — [2]) Arch. f. d. ges. Physiol. **50**, 596. — [3]) Ebenda **74**, 37. — [4]) Sitzungsber. d. Wiener Akad., mathem.-naturw. Kl., **112** (1903). — [5]) Arch. f. d. ges. Physiol. **3**, 172.

Über die Wirkungsweise der Bogengänge entwickelte dann Goltz seine Anschauung in folgender Form: „Wir wollen annehmen, daß die in den Ampullen vorhandenen Nervenendigungen in ähnlicher Weise geeignet sind, durch Druck oder Dehnung erregt zu werden, wie etwa die dem Drucksinne dienenden Nerven der äußeren Haut. Die in den Bogengängen befindliche Flüssigkeit (Endolymphe) wird nach bekannten physikalischen Gesetzen diejenigen Abschnitte der Wandung am stärksten anspannen, welche am meisten nach abwärts gelegen sind. Je nach der Stellung des Kopfes wird die Verteilung des Druckes der Flüssigkeit wechseln, und einer jeden Kopfhaltung wird demgemäß immer eine bestimmte Form der Nervenerregung entsprechen."

Breuer nahm den biologischen Grundgedanken der Theorie auf, bewies aber, daß die eben angeführte physikalische Auffassung über die Reizentfaltung im Bogengangsystem nicht aufrecht zu halten sei. Die Endolymphe könnte dehnend auf die einzelnen Ampullen je nach der Schwererichtung nur dann wirken, wenn das häutige Labyrinth in Luft oder einem anderen Medium aufgehängt wäre, das wesentlich geringere Dichte besitzt als die Endolymphe. Nun ist aber das Labyrinth in die Perilymphe gebettet, eine Flüssigkeit von gleicher oder doch sehr ähnlicher Dichte wie die Endolymphe. Die Schwere also kann es nicht sein, durch die der Inhalt der Kanäle vorwiegend auf die Ampullennerven wirkt.

Die im wesentlichen richtige Erklärung gaben Mach (l. c.), Breuer und Brown[1]) fast gleichzeitig und unabhängig voneinander, indem sie darauf hinwiesen, daß bei jeder Drehbewegung des Kopfes der endolymphatische Inhalt der Bogengänge zufolge der Trägheit zunächst etwas zurückbleiben, in demjenigen Bogengange also, in dessen Ebene die Drehung erfolgt, eine gegensinnige Strömung der Endolymphe eintreten muß. Da, wie oben beschrieben, die Ampullennerven mit ihrer Cupula in das Innere des Kanales weit hineinragen, müssen sie von der Strömung ergriffen und seitwärts abgebogen werden, was voraussichtlich zu einer Erregung der zwischen den Haarzellen endigenden Nerven führt. Je nach der Drehungsachse des Kopfes wird der beschriebene Vorgang in dem einen oder anderen der Bogengänge auftreten, und zwar stets in je einem Bogengang des rechten und einem des linken Labyrinths. Kopfdrehung um die Longitudinalachse wird in den beiden horizontalen (äußeren) Bogengängen Strömung erzeugen; Drehung in der Ebene des rechten vorderen Vertikalgangs muß zufolge der eigenartigen Anordnung der Gänge (vgl. Fig. 130) gleichzeitig auch auf den linken hinteren Bogengang wirken usw. Bei denjenigen Bewegungen, die nicht genau in der Ebene eines der Kanäle erfolgen, und das ist die überwiegende Mehrzahl aller, werden mehrere Kanäle gleichzeitig in Tätigkeit treten.

Es ist nun aber klar, daß die physikalischen Bedingungen für die durch Trägheit bewirkte gegensinnige Strömung der Endolymphe nur so lange gegeben sind, als der Bogengang als Ganzes eine Beschleunigung seiner Drehbewegung erfährt. Sehr bald nachdem die Bewegung eine gleichförmige geworden ist, muß im Innern der Kanäle Ruhe herrschen, Wand und Inhalt bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit und ohne gegenseitige Verschie-

[1]) Journ. of Anat. and Physiology 8, 327.

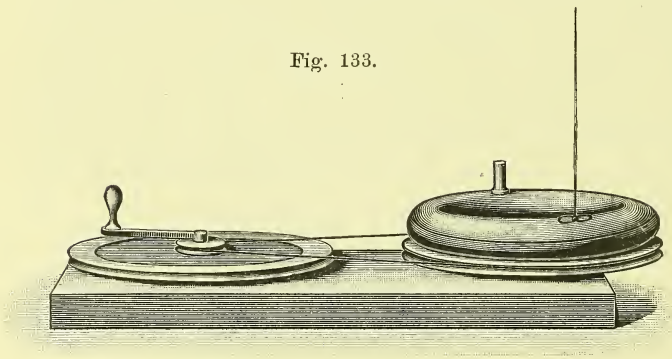
bung. Die verbogen gewesenen Sinneshaare der Ampullen samt Cupula werden wieder in ihre Ruhelage zurückkehren.

Sowie jedoch der Drehbewegung eine positive oder negative Beschleunigung zugefügt wird, spielt sich von neuem eine Verschiebung des endolymphatischen Inhalts ab. Insbesondere muß bei plötzlichem Anhalten der Drehung die Endolymphe die ihr mitgeteilte Bewegung noch eine kurze Zeit fortsetzen, und diese Strömung wird die Cupula im Sinne der vorhergegangenen Drehungsrichtung verbiegen. Über die spezielleren Bedingungen der Flüssigkeitsbewegung in den Ampullen (sie scheinen in den verschiedenen Ampullen verschieden zu sein) vgl. Breuers ausführliche Erörterungen. Um erhebliche Verbiegungen der Cupula wird es sich wohl sicherlich nicht handeln. Die Wiederherstellung einer Normalruhestellung des Gebildes könnte man sich durch Elastizität oder durch aktive einseitige Kontraktion der Cilien erklären.

Das bisher Gesagte enthält wenigstens im Qualitativen keine Voraussetzung, an deren Berechtigung ernstlich zu zweifeln wäre, es handelt sich um einfache physikalische Prozesse, die sich an geeigneten Modellen leicht klar machen lassen (vgl. hierüber namentlich Mach, Bewegungsempfindungen, 1. Kap. Die mechanischen Grundsätze).

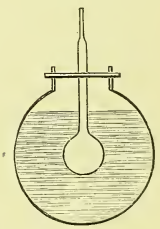
Ein recht zweckmäßiges Modell zur Veranschaulichung der Mach-Breuerschen Theorie der Bewegungsfunktion ist in Freiburg i. B. im physiologischen Institut seit längerer Zeit im Gebrauch. Fig. 133 zeigt das sehr ähnliche Modell, das

Fig. 133.



Modell zur Erläuterung der Bogengangsfunktion.

Fig. 134.



Durchschnitt des Rohres mit dem in der Flüssigkeit hängenden Pendel.

ich zur Demonstration verwende. Auf einer Drehscheibe kann ein ringförmiges Kupferrohr von 6 cm Rohrweite in langsame Rotation versetzt werden. Es ist mit Wasser fast ganz gefüllt. An einer Stelle seiner Oberseite besitzt es eine Schlitzöffnung, durch die ein leichtes Pendel ins Wasser hinabhängt; das Pendel ist in einem einfachen Achsenlager aufgehängt und verlängert sich oberhalb der Achse in einen langen Strohhalm, der die Stellung weithin sichtbar macht. Versetzt man die Scheibe (am besten durch einen gleichmäßig laufenden Motor) in Rotation, so zeigt das Pendel das Zurückbleiben der Flüssigkeit, der Halm neigt sich nach vorn. Je mehr die Drehung gleichförmig wird, desto mehr richtet sich der Halm auf, und verfügt man über eine recht gleichmäßige Rotationseinrichtung, so kann man selbst bei ziemlich raschem Gang den Zeiger vertikal stehen sehen. Jede positive oder negative Beschleunigung markiert sich aber sofort durch entsprechende Bewegung des Zeigers. Nach dem Anhalten legt sich der Halm stark zurück, der Ausdruck der Rotationsremanenz.

Der ernsteste Einwand [1]), der der Mach-Breuerschen Theorie und insbesondere auch ihrer Erläuterung durch ein Modell wie das oben beschriebene gemacht werden kann, gründet sich auf die Kleinheit der Dimensionen der Bogengänge, speziell ihre geringe Weite. Diese beträgt beim Menschen bis zu etwa 0,1 mm^2, bei der Taube 0,04 mm^2 [2]). In so engen Kanälen ist die Reibung des Inhaltes an der Wand so beträchtlich, daß sie das bei einer Beschleunigung erteilte Trägheitsmoment ganz oder fast ganz aufzehrt. Zu einer irgendwie erheblichen Strömung des Inhaltes kann es also nicht kommen.

Mach sowohl wie Breuer haben dieses Bedenken bald erkannt und ihm durch die ergänzende Annahme Rechnung getragen, daß es sich nur um außerordentlich kleine Massenverschiebungen im Labyrinth handele, also nicht um Strömungswirkung, sondern um Stoßwirkung der Endolymphe auf die Cupula. Am Prinzip der Lehre ändert das natürlich nichts. Ihre spezielle Ausgestaltung nach bestimmter Richtung siehe bei Breuer. Erwähnt sei hier nur, daß, wie Breuer treffend sagt, man sich auch jeden Bogengang durch eine membranöse Scheidewand durchtrennt denken könnte, in der sich die mechanisch erregbaren Nervenenden befinden. Der Stoß der Flüssigkeit würde die Scheidewand nach der einen oder anderen Richtung vorbuchten, die Nerven dabei zerren. So wäre also Erregung möglich, ohne daß ein tatsächlicher Flüssigkeitsstrom zustande kommt. Im Bogengang fehlt nun allerdings eine solche Membran, aber die in das Lumen hineinragende Cupula muß, da sie gerade im Wege des Flüssigkeitsstoßes steht, einigermaßen ähnlich wirken.

An dem beschriebenen Modell könnte man auch eine nach diesem Prinzip wirkende verschließende Membran anbringen, deren Verbiegung durch den Flüssigkeitsstoß wiederum durch einen Zeiger angezeigt werden könnte.

Den tatsächlichen Verhältnissen noch näher kommt man dadurch, daß man das Wasser im Modellrohr durch eine halbflüssige Substanz ersetzt, deren Zähigkeit durch innere und äußere Reibung das Zustandekommen einer Strömung bei mäßigen Umdrehungsgeschwindigkeiten selbst in dem weiteren Rohr verhindert. Hierzu kann z. B. heißer, noch nicht erstarrter Stärkekleister dienen. Das in diesen eintauchende Pendel zeigt die oben beschriebenen Ausschläge zwar nicht in so großem Umfang wie bei Wasserfüllung, aber immer noch überraschend deutlich; auch die Schiefstellung bei plötzlichem Anhalten der Drehung ist evident und keineswegs nur momentan, wie man bei dem völligen Fehlen einer Strömung vermuten könnte.

Machen wir nun mit Mach und Breuer die Annahme, daß jede Verbiegung der Sinneshaare in den Ampullen die Empfindung einer Kopfdrehung in dem dieser Verbiegung entgegengesetzten Sinne bewirke, so ist der größte Teil der bei Drehung auftretenden Empfindungen aufs einfachste erklärt. Wir erinnern uns der oben erwähnten Feststellung

---

[1]) Minder gewichtig ist der Einwand von Hensen (Arch. f. d. ges. Physiol. **74**, 37), die bei vielen Tieren, speziell bei Fischen, recht ungleiche Länge der einzelnen Bogengänge spreche gegen die Mach-Breuersche Theorie. Breuer (Wiener Sitzungsber. **112**, 1903) weist hingegen treffend darauf hin, daß von dem besonders langen Bogen, dem vorderen Vertikalkanal, dasjenige Stück, um das es länger ist als die übrigen Gänge, aus seiner eigentlichen Ebene stark abgebogen ist, bei Bewegungen in jener Ebene mechanisch also gar nicht in Betracht kommt. — [2]) Biner Wulf, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1901.

Machs, daß im Beginn einer Drehbewegung, sowie während jeder positiven Beschleunigung einer Drehbewegung diese als solche empfunden wird, und zwar im richtigen Sinne, daß aber eine Drehbewegung, sobald sie gleichförmig geworden ist, überhaupt nicht mehr empfunden wird (solange die Stellung des Kopfes zur Drehungsachse unverändert bleibt, s. u.), daß endlich beim Eintritt negativer Beschleunigung die Empfindung der gegensinnigen Drehung erfolgt. Auch der Machsche Drehschwindel erklärt sich auf diese Weise: nach dem Anhalten der Drehung erzeugt die noch weiter im Sinne der Drehung vorstoßende Lymphe bzw. die Verbiegung der Cupula die Empfindung der Rotation in umgekehrter Richtung.

Die Mach-Breuersche Deutung des Bogensystems als eines Sinnesorgans zur Empfindung der Beschleunigung von Drehbewegungen wird also den fundamentalen Tatsachen der Drehungsempfindungen aufs beste gerecht. Sie rückt aber auch manche spezielle, auf den ersten Blick überraschende Beobachtungen dem Verständnis näher. So erklärt sich hiernach, warum ein Beobachter, der, passiv in gleichförmige Rotation versetzt, keine Drehempfindung mehr hat, bei plötzlicher aktiver Drehung des Kopfes um 90° die Rotation und ihre Richtung wieder richtig empfindet. Es wird dadurch dem bisher ruhenden Inhalt eines Bogengangpaares eine vorübergehende Beschleunigung erteilt.

Wohl mit allen anderen Sinnesorganen teilt, wie ich mit Breuer, Delage u. a. annehme, das Bogengangsystem die Eigenschaft, außer den Empfindungen auch Reflexe auszulösen. In seiner Eigenschaft als reflexauslösendes Organ scheint der Bewegungsapparat im wesentlichen den gleichen Erregungsgesetzen zu folgen wie der Sinnesapparat. Als reagierende Organe kommen in erster Linie die Augenmuskeln in Betracht, die bei Körperdrehungen den Augen Drehungen erteilen. Hier sei auf diese Reflexe nur kurz hingewiesen, wir werden auf sie sogleich zurückzukommen haben, wenn die übrigen Teile des Labyrinths besprochen sind.

Mach hatte schon, als er die Theorie der Labyrinthfunktion entwickelte, die Ansicht ausgesprochen, es dürften nicht nur für die Perception der Drehbeschleunigungen, sondern auch für die Perception der Beschleunigungen geradliniger Progressivbewegungen und für die Perception der Lage (Orientierung zur Vertikalen) besondere Organe im Labyrinth existieren. Breuer unternahm die Prüfung dieser Frage an der Hand scharfsinniger Überlegungen und geschickter Versuchsanordnungen. Es ist ihm gelungen, das zum mindesten sehr wahrscheinlich zu machen, daß die spezifische Empfindung der Lage vom Otolithenapparat vermittelt wird. Hinsichtlich der Perception der Progressivbeschleunigung im Labyrinth hat sich Breuer mit Recht sehr vorsichtig ausgesprochen. Ich halte es für die Progressivbewegung in horizontaler Ebene nicht für erwiesen, daß dem Labyrinth eine derartige Funktion zuzuschreiben ist, jedenfalls ist sie, wenn überhaupt vorhanden, äußerst schwach entwickelt, wie übrigens auch Breuer selbst zugibt.

Grundlage der Breuerschen Theorie der Lageempfindung ist die Annahme, daß der Otolithenklumpen auf der Macula so viel dichter ist als die Endolymphe, daß er bei den verschiedenen Kopfstellungen die Sinneshaare der Macula in verschiedener Weise durch Zug oder Druck reizt. Bei horizontaler Lage einer Macula würde der Otolith senkrecht von oben nach

unten auf die Haare drücken, die ihn tragen. Bei der umgekehrten Lage, Otolithen unten, Epithel der Macula oben, muß die Otolithenmasse an den Haaren ziehen. In allen dazwischen liegenden Stellungen des ganzen Systems muß an den Haaren eine Verbiegung eintreten, die ein Maximum etwa dann erreichen würde, wenn die Ebene der Macula und der Otolithenplatte senkrecht im Raume steht.

Der sofort in die Augen fallende Unterschied dieser Wirkungsweise gegenüber der oben skizzierten Funktion der Cupula in den Ampullen liegt darin, daß die supponierten Zug-, Druck- und Verbiegungswirkungen im Otolithenapparat, soweit es die mechanischen Verhältnisse betrifft, so lange anhalten müssen, als die Stellung des ganzen Systems im Raume dieselbe bleibt, während die mechanischen Einflüsse auf die Cupula nur so lange bestehen, als die Bewegung des Labyrinthinhalts eine Beschleunigung erfährt.

Aus der von uns angenommenen Wirkungsweise des Bogengangsystems dauernde Empfindungen der Kopflage oder anhaltende tonische Beeinflussungen reflektorisch innervierter Muskelgruppen zu erklären, geht nicht wohl an, seitdem die Auffassung von Goltz verlassen ist, der zufolge die Gravitation des Ampulleninhaltes entscheidend für die dort ausgelösten Empfindungen sein sollte. Hier hat nun die Breuersche Theorie die Goltzsche abgelöst, indem sie das Gravitationsprinzip zwar beibehielt, es aber zutreffender auf die Otolithen statt auf die Endolymphe anwandte. Bei der hiermit angenommenen Duplizität der Labyrinthfunktion hinsichtlich der Erregungsweise erklärt sich aufs beste die Trennung der Empfindungen und Reflexe, die nur während der Kopfbewegung auftreten, und derjenigen, die von der dauernden Lage des Kopfes im Raume abhängen. Wie oben auseinandergesetzt wurde, gibt es Empfindungen der Lage des Körpers, die neben den Haut- und Gelenkempfindungen bestehen und von einer künstlichen Verstärkung und Schwächung der letzteren unabhängig sind. Diese Lageempfindungen beziehen sich allerdings ganz überwiegend auf die Lage des Kopfes; über die Lage des Kopfes relativ zum Rumpfe geben uns anderseits die Haut- und Gelenkempfindungen hinreichend sichere Auskunft, um zu verhindern, daß (bei geschlossenen Augen) die Lage des Gesamtkörpers nur nach der Lage des Kopfes beurteilt werde und somit grobe Täuschungen eintreten. Solche sind denn auch für die normalen Verhältnisse des täglichen Lebens gänzlich vermieden, und es bedarf besonderer Versuchsanordungen, wie der oben erwähnten Beobachtungen Delages auf dem „Zapfenbrett", um überhaupt nachzuweisen, daß Täuschungen über die Körperlage durch ungewöhnliche Kopfstellungen bewirkt werden können.

Es gibt auch „Reflexe der Lage", wie man sie abkürzend im Vergleich zu den Reflexen auf Körperdrehbewegungen bezeichnen kann. Es sind das beim Menschen hauptsächlich die kompensatorischen Augenbewegungen, die bei Einnahme einer Schieflage des Kopfes eintreten und bei anhaltender Schieflage auch bestehen bleiben. In die gleiche Kategorie gehören die Reflexe, durch die, wie oben erwähnt, die Vögel, die Schlangen und Echsen den Kopf in bestimmter Orientierung zur Vertikalen halten, gleichgültig, wie der Rumpf orientiert ist. Es ist nicht zu leugnen, daß derartige Reaktionen auch unter Heranziehung nur der Bogengänge als reflexauslösender Organe zur Not erklärt werden könnten, jedoch nur in etwas gezwungener Weise.

Es könnte daran gedacht werden, daß die durch die Erregung der Ampullarnerven bewirkten Augenmuskelreaktionen nach dem Aufhören des Beschleunigungsreizes wieder zum Teil rückgängig werden, ohne daß nun gerade sogleich der wirkliche Gleichgewichtszustand der Augenmuskulatur wiederhergestellt zu werden braucht. In diesem Falle wären die bei dauernder Schieflage des Kopfes bestehenden Bulbusrollungen nicht als Ausdruck eines anhaltenden Erregungszustandes im Labyrinth zu betrachten. Gegen diese Auffassung spricht aber, wie schon Breuer hervorhob, die Beobachtung A. Nagels, daß die Rollung der Augen auch eintritt, wenn man sich aus der Rückenlage in die Seitenlage wälzt, wobei man kaum annehmen kann, daß in der auf die Drehungsebene senkrechten (frontalen) Ebene dem Bogenganginhalt ein Drehungsimpuls gegeben wird. Die Rollungen anderseits, die eintreten, wenn man mit auf die Brust gesenktem Kinn, also abwärts gerichtetem Blick, Drehungen um die Vertikale ausführt (Breuer), sind stets nur vorübergehende, sie werden völlig rückgängig, wenn die Bewegung sistiert wird. Hierbei wird eben das Labyrinth gegen die Vertikale nicht verstellt, die Gravitation wirkt unverändert, ganz anders, als wenn die Gesichtsebene vertikal steht und in dieser Ebene seitwärts geneigt wird.

Bei weitem wahrscheinlicher ist es, daß diese mit Schieflagen des Kopfes verknüpften Reflexe in einem Sinnesorgan ausgelöst werden, in welchem der Schwerezug die Rolle des Reizes spielt. Ein solches Organ aber ist das Otolithenorgan. Über die Lage der Otolithenplatten beim Menschen gibt Breuer an, daß die *Macula utriculi* mit der Ebene der sogenannten horizontalen Bogengänge in gleicher Richtung orientiert ist; bei normaler aufrechter Kopfhaltung sind beide um 45° nach rückwärts geneigt. Die Ebene der Otolithenplatten des Sacculus liegt beiderseits parallel in einer Sagittalebene, von hinten oben nach vorn unten in einem Winkel von 45° verlaufend. Aus Breuers anatomischen Untersuchungen geht ferner hervor, daß bei der Katze und dem Meerschweinchen die Macula des Utriculus und die des Sacculus in aufeinander senkrechten Ebenen stehen. Die niederen Wirbeltiere bis zu den Vögeln aufwärts besitzen noch eine dritte Macula mit Otolithen in der sog. Lagena. Die Orientierung der drei Maculae hat Breuer zusammengestellt, indem er jedesmal die „Gleitrichtung" der Otolithenplatte angibt.

Bei den Fischen: Utriculus horizontal, Sacculus horizontal von vorn nach hinten. Lagena vertikal von oben nach unten.

Beim Frosch: Utriculus horizontal, Sacculus? Lagena vorn oben innen nach unten hinten außen.

Bei den Vögeln: Utriculus horizontal, vorn innen nach hinten außen. Sacculus: horizontal, vorn außen nach hinten innen. Lagena: oben (außen hinten) nach unten (innen vorn).

Breuer ist geneigt anzunehmen, daß die „Gleitrichtung" mit der „Perceptionsrichtung" zusammenfällt, d. h. daß eine horizontal verschiebliche Otolithenplatte der Perception horizontaler Bewegungen und der horizontalen Lage diene. Man könnte sich mangels genauerer Feststellungen auch vorstellen, daß die horizontale Macula gerade für die Perception vertikalen Zuges oder Druckes bestimmt ist. Für die Breuersche Auffassung ist jedenfalls die Tatsache nicht sonderlich günstig, daß beim Menschen die Progressivbeschleunigungen in vertikaler Richtung entschieden am deutlichsten empfunden werden, während doch gerade das Organ der Lagena mit seiner vorwiegend vertikalen Gleitrichtung dem Menschen fehlt. Erhebliche Bedeutung wird indessen derartigen Überlegungen nicht zukommen, da noch allzu viel von den tatsächlichen Verhältnissen unbekannt ist.

Vom physikalischen Standpunkt aus erscheinen, wie Breuer hervorhebt und in der Tat zuzugeben ist, die Otolithenapparate auch geeignet, die Empfindung der Beschleunigung einer Progressivbewegung zu vermitteln. Wie die Schwerkraft, so könnte und müßte auch die Trägheit die Otolithen mit ihren biegsamen Trägern, den Haaren, verschieben, im Beginn einer geradlinigen Progressivbewegung müßten die Otolithen zunächst etwas zurückbleiben, solange die Bewegung noch eine positive Beschleunigung erfährt. Die relative Verschiebung zwischen Otolithenmasse und Maculaepithel wäre in diesem Falle etwa dieselbe, wie wenn der Kopf aus der vertikalen Normalstellung hintenüber geneigt würde. Umgekehrt, eine negative Beschleunigung geradliniger Progressivbewegung würde so wirken müssen wie eine Vornüberbeugung des Kopfes.

Demgemäß sollte man eigentlich in diesen Fällen den Eintritt von Lagetäuschungen erwarten; man müßte z. B., wie Breuer anführt, bei einem Sprung nach vorwärts den Eindruck haben, hintenüber geneigt zu sein. Derartige Erfahrungen hat man aber meines Wissens bis jetzt nicht gemacht. Wohl aber kommt die Empfindung der Schieflage bei tatsächlicher gerader Normalstellung zustande, wenn der Körper in gekrümmter Bahn bewegt wird, z. B. bei der Karussellbewegung und besonders bei der Rotation in dem Machschen Apparat, in dem der Beobachter in einer Kreisbahn bewegt wird mit der Blickrichtung zur senkrechten Rotationsachse hin oder von dieser weg. In diesem Falle wirkt auf die Otolithen außer der in gewohnter Weise wirkenden Schwerkraft die Centrifugalkraft, und die wirksame Zugrichtung liegt in der Resultierenden aus diesen beiden Kräften.

Wie schon oben erwähnt wurde, tritt nun in diesem Falle in der Tat die Täuschung auf, daß die Achse des Körpers schief stehe, also gegen die Vertikale verlagert sei, und zwar im Sinne der Annäherung an jene Resultante aus Schwere- und Centrifugalbeschleunigung. Bemerkenswert ist bei dieser Lagetäuschung, daß sie, soweit bekannt, nicht nur während der beschleunigten und verlangsamten Rotation auftritt, sondern auch bestehen bleibt, wenn diese gleichförmig ist. Hierdurch erscheint die Zurückführung der Empfindung auf Strömung oder Stoß im Labyrinthinhalt unzulässig, es ist vielmehr in diesem Verhalten ein deutlicher Hinweis auf das Otolithenorgan als Auslösungsort zu erblicken.

Dabei bleibt freilich immer noch unerklärt, warum die Richtung der Massenbeschleunigung nur bei den Bewegungen in gekrümmter Bahn, nicht aber bei den geradlinigen empfunden wird. Breuer, der (ohne einen ganz überzeugenden Beweis) auch die Existenz der Empfindung von Progressivbewegung annimmt, stellt die Hypothese auf, die Erregung des Otolithenorgans erzeuge Lage- oder Bewegungsempfindung, je nachdem gleichzeitig die Ampullennerven mit erregt werden oder nicht, d. h. in den Fällen, in denen (durch Erregung in den Ampullen) eine Drehungsempfindung auftritt, werde die Veränderung der Angaben des Otolithenapparates als Lageveränderung interpretiert; wenn keine Drehungsempfindung sie begleitet, als Progressivbewegung. Um diese Annahme plausibel zu machen, verweist Breuer auf gewisse analoge Fälle, in denen die Erregung eines Sinnesorgans verschieden gedeutet werden kann, je nachdem bestimmte andere Empfindungen die erstere begleiten oder nicht. So wird das Hingleiten eines Bildes über die

Netzhaut auf Bewegung des gesehenen Objekts bezogen, wenn die Augenmuskeln in Ruhe bleiben, während das Objekt im allgemeinen ruhend erscheint, wenn man die Bewegung des Auges oder Kopfes empfindet.

Ich kann diese Auffassung darum nicht zutreffend finden, weil nach Machs Erfahrung die Empfindung der Schieflage bei Karussellbewegung auch während der gleichförmigen Drehung stattfand, d. h. also unter Umständen, unter denen überhaupt keine Drehungsempfindung und keine Erregung der Ampullennerven vorhanden ist. Ich würde eher daran denken, daß die Otolithenorgane auf eine relativ langsame Reaktionsweise eingerichtet sind, in der Art, daß eine Verschiebung der Otolithenplatten wohl durch dauernde Einwirkung der Gravitation oder der Centrifugalkraft erzielt wird, daß dagegen unter den Beobachtungsbedingungen, die für uns gegeben sind, wenn wir eine geradlinige Progressivbewegung ausführen, die Periode positiver oder negativer Beschleunigung zu kurz oder die Beschleunigung selbst zu geringfügig ist, um das träge Organ zu erregen.

Dadurch würde sich erklären, warum wir beim Sprung nach vorn nicht die Empfindung der Rückwärtsneigung haben und ebensowenig beim Anfahren und Anhalten eines Eisenbahnzuges entsprechenden Lagetäuschungen unterliegen. Das Otolithenorgan, das uns durch die Empfindung der Lage wertvoll ist, würde unnütz und unzweckmäßig, wenn es auch bei der Progressivbewegung in Tätigkeit träte. Ich glaube also, daß die Otolithenapparate uns überhaupt nur Lageempfindungen vermitteln, daß aber die Erregung durch Progressivbewegung ganz oder doch fast ganz verhindert ist, wenigstens für diejenigen Bewegungsarten, die uns häufig vorkommen.

Die Empfindung der Progressivbewegung ist ja, wie schon oben erwähnt wurde, eine recht unvollkommene. Bei gleichförmiger Bewegung fehlt sie (wie übrigens auch im Falle der Drehbewegung) völlig. Die Beschleunigung (positive oder negative) einer horizontalen geradlinigen Bewegung empfinden wir nur, wenn es sich um sehr erheblichen Geschwindigkeitswechsel handelt (Eisenbahn). Schon auf Dampf- oder Segelschiffen fällt für mich die Empfindung der translatorischen Bewegung fort. Auch die bei der Drehbewegung so deutliche Empfindung gegensinniger Drehung bei verzögerter Rotation hat, wie oben erwähnt, bei der Progressivbewegung nur ihr sehr unvollkommen entwickeltes Analogon: bei sehr schnellem Anhalten eines Eisenbahnzuges kann die Empfindung der Bewegungsumkehr auftreten, doch findet man dieses Phänomen erstens überhaupt nicht häufig und stets nur ziemlich undeutlich ausgeprägt. Im Ruderboot, dessen Bewegung verlangsamt wird, tritt diese Bewegungstäuschung überhaupt nicht auf, wie schon Delage bemerkt hat; die Verzögerung erfolgt hier in zu geringem Ausmaße. Anderseits wären gerade in dem glatt und geräuschlos gleitenden Boote die Beobachtungsbedingungen weit günstigar als im rollenden Eisenbahnzuge.

Sehr viel deutlicher ist die Beschleunigungsempfindung und Bewegungstäuschung bei der Progressivbewegung in vertikaler Richtung (im Aufzug, in der Förderschale eines Schachtes). Hier wird die Beschleunigung beim Bewegungsbeginn empfunden, und trotz der relativ geringen Maximalgeschwindigkeit tritt fast stets bei der Verlangsamung der Bewegung die Empfindung der Bewegungsumkehr ein. Ob diese einzige deutliche Emp-

findung der Progressivbewegung vom Labyrinth vermittelt wird und eventuell von welchem Teile desselben, das sind meines Erachtens nach durchaus offene Fragen. Es wäre doch immer noch zu erwägen, ob nicht kombinierte Funktion der Bogengänge hierbei im Spiele ist.

Nachempfindungen nach längerer Progressivbewegung in irgendwelcher Richtung scheinen nicht vorzukommen oder jedenfalls nur bei excessiv starkem Bewegungsreiz.

Die spezifische Disposition für den adäquaten Reiz ist vielleicht bei keinem Sinnesorgan so klar verständlich wie bei den Ampullen- und Otolithenapparaten auf Grund der Mach-Breuerschen Hypothese. Andere Reize sind mit großer Sicherheit ferngehalten — daß jene Organe zur Reaktion auf Schallwellen besonders geeignet seien, wird wohl heutzutage kaum mehr behauptet werden —; anderseits gibt uns die Theorie die Möglichkeit, die Massenbeschleunigung als wirksamen Reiz für die beiden Organarten zu denken, und zwar in den verschiedenen Formen der Gravitation, der Trägheit und der Centrifugalkraft. In den übrigen Sinnesorganen des Menschen dagegen ist, wie bekannt, die Anordnung der Nervenendigungen, soweit sie überhaupt für mechanischen Reiz erregbar sind, so getroffen, daß eine Umformung einer etwaigen Massenbeschleunigung in einen wirksamen mechanischen Nervenreiz ausgeschlossen erscheint.

Auch dem Prinzip der spezifischen Sinnesenergien fügen sich die (nicht akustischen) beiden Sinnesorgane im Labyrinth recht gut ein. Vor allem erweist sich die Bewegungsempfindung als ein Empfindungsgebiet durchaus eigener Art, ohne Verbindungsglieder zu anderen Sinnesgebieten hinüber, also als eine Modalität der Empfindung im Sinne von Helmholtz.

Unter den Bewegungsempfindungen sind es ja wiederum die Drehungsempfindungen, die am schärfsten markiert heraustreten. Ihre Analyse führt ohne weiteres zu einer Gliederung nach drei Komponenten, entsprechend den drei Dimensionen des Raumes. Minder zuversichtlich wird man sich über die Qualitäten der Empfindung von translatorischer (Progressiv-) Bewegung aussprechen können, bezüglich deren es doch manchem immer noch schwer fällt, sie als einfache Empfindung anzuerkennen. Wie aus den vorausgehenden Kapiteln erhellen dürfte, ist auch, wenigstens bei den jetzigen Arbeitsmethoden, wenig Material an die Hand gegeben, den Zweifelnden von der Existenz spezifischer Empfindungen der Progressivbewegung zu überzeugen. Am ehesten dürfte das noch hinsichtlich der Bewegung in vertikaler Richtung gelingen.

Drehungsempfindungen irgendwelcher Art in Progressivbewegungen aufzulösen, würde mir ebenso sehr wiederstreben, wie die Bewegungsempfindung in eine kontinuierliche Reihe von Lageempfindungen aufzulösen; schon die Deutlichkeit der Drehempfindung gegenüber der Undeutlichkeit der Progressivbewegungsempfindung spricht hiergegen.

Was die Lageempfindung betrifft, so existiert sie ja zweifellos als eine besondere Empfindungsmodalität, aber, für mich wenigstens, nur als eine Empfindung der „Orientierung zur Vertikalen“. Was andere Autoren berichten, spricht mehr oder weniger deutlich im selben Sinne. Darum kann ich auch, wie gesagt, Mach nicht beipflichten, wenn er sagt, die Empfindung der Drehung oder der Progressivbewegung lasse sich psychologisch auflösen in

eine Folge von Lageempfindungen [1]). In aufrechter Stellung um die vertikale Achse gedreht haben wir unter geeigneten Umständen Drehungsempfindung. Die einzelnen Lagen aber, die wir dabei hintereinander durchlaufen, empfinden wir alle in genau der gleichen Qualität, d. h. einfach als Vertikallage, und nicht als Vertikallage mit Gesicht nach Nord, nach Ost, nach dieser oder nach jener Richtung. Eine solche psychologische Auflösung arbeitet also mit fingierten Empfindungselementen und ist unfruchtbar wie die ganze Lehre von den Empfindungselementen überhaupt.

Es möge übrigens nicht unerwähnt bleiben, daß Mach selbst die Möglichkeit zugesteht, daß der „Empfindung der Geschwindigkeit" (wie er sich an dieser Stelle ausdrückt) ein Vorgang eigener Art zugrunde liegt.

Es liegt natürlich nahe, auch der Modalität der Lageempfindung eine Gliederung nach drei Qualitäten, wiederum entsprechend den Dimensionen des Raumes, zuzuschreiben. Breuer sucht ihr anatomisches Korrelat in den drei Otolithenapparaten mit ihrer verschiedenen „Gleitrichtung", braucht dieselben Organe aber auch, wie aus obiger Darstellung erinnerlich, für die Empfindung der Progressivbewegung und mußte nun eine Hilfsannahme machen, um zu erklären, warum die Maculaepithelien in einem Falle spezifische Lageempfindung, im anderen Bewegungsempfindung vermitteln. Ich kann, wie gesagt, diese Hilfsannahme nicht glücklich finden und überhaupt die Vermittelung von Bewegungsempfindungen durch die Otolithenorgane nicht für hinreichend erwiesen halten.

Erkennt man den Bogengängen und den Otolithenapparaten beziehungsweise die spezifische Energie der Drehungsempfindung und der Lageempfindung zu, so erhebt sich sogleich die weitere Frage, ob im Epithel der einzelnen Ampulle bzw. Macula Nervenendigungen von zwei verschiedenen Energien enthalten sind, deren Erregung die Empfindung entgegengesetzter Bewegung bzw. Orientierung bewirkt, oder ob die Verbiegung der Sinneshaare in der einen oder der anderen Richtung gegensätzliche Empfindung vermittelt, trotzdem Nervenfasern von nur einer Art vorhanden sind. Die dritte Möglichkeit endlich wäre die, daß jedes einzelne Epithel nur in einerlei Weise anspricht, z. B. jede einzelne Ampulle nur bei Drehung in einem bestimmten Sinne. Um die Gesamtheit der Drehungsempfindung herauszubekommen, muß dann ein untrennbarer Zusammenhang zwischen den Angaben der beiderseitigen Labyrinthe gefordert werden, in der Art, daß etwa der horizontale Bogengang der rechten Seite auf Rechtsdrehung des Kopfes um die Vertikalachse, der linke horizontale auf Linksdrehung reagiert oder umgekehrt.

Mach hatte sich in seiner ersten Mitteilung zur Bogengangsfrage im ersteren Sinne entschieden, d. h. zweierlei Nervenendigungen in einem Epithel postuliert. Späterhin, in seiner ausführlicheren Publikation schloß sich Mach der Anschauung Browns an, der das Zusammenarbeiten beider Labyrinthe voraussetzte.

Auf Grund der Versuche Ewalds mit dem pneumatischen Hammer wird diese Auffassung nicht mehr aufrecht erhalten werden können. Entscheidend scheint mir folgender Versuch (Ewald, l. c., S. 264). Der pneu-

[1]) Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen, S. 122.

matische Hammer (s. o., S. 787) ist so am Kopf einer Taube umgebracht, daß er beim Niedergehen den rechten horizontalen Bogengang komprimiert. An und für sich könnte nun die Flüssigkeit nach beiden Seiten ausweichen, zur Ampulle hin und zum ampullenlosen Ende. Der letztere Weg aber ist durch eine Plombe im knöchernen Kanal gesperrt. Wird nun durch Luftdruck der Hammer vorgetrieben, so reagiert das Tier regelmäßig mit einer starken Kopfwendung nach links in der Ebene des Kanals. Trotzdem der Hammer andauernd den häutigen Gang komprimiert, kehrt der Kopf alsbald in die Normalstellung zurück. Wird jetzt der Hammer vom Bogengang abgehoben, so daß die Endolymphe wieder zurückströmen kann, so erfolgt eine Kopfwendung nach rechts. Entgegengesetzte Lymphbewegungen in einem und demselben Kanal erzeugen also entgegengesetzte Kopfwendungen und demgemäß aller Wahrscheinlichkeit nach auch entgegengesetzte Drehungsempfindungen.

Bemerkenswert ist, daß beim horizontalen (äußeren) Kanal der Flüssigkeitsstoß zur Ampulle hin die stärkere Reaktion auslöst, bei den beiden anderen Kanälen dagegen die umgekehrte Flüssigkeitsverschiebung die wirksamere ist.

2. Andere Auffassungen von der Funktion des Labyrinths.

Nur in aller Kürze sei erwähnt, daß dieselben Gründe, welche Mach zu seiner Theorie der Labyrinthfunktion führten, zunächst auch auf ein anderes im Kopf befindliches Organ, das Gehirn, als Auslösungsort der Bewegungsempfindung führen konnten; so nahm denn auch tatsächlich Purkinje das Gehirn hierfür in Anspruch. Mach erwog dieselbe Möglichkeit, um sie aber alsbald durch die bessere Theorie zu ersetzen.

Goltz. Die Mach-Breuer-Brownsche Theorie der Labyrinthfunktion in ihrer durch Breuer hinsichtlich der Otolithenapparate ergänzten Form steht meines Erachtens in ihren wesentlichen Grundlagen heutzutage unbestreitbar festgegründet. Wo noch einzelne Fragen der Erklärung harren, darf man die Zuversicht hegen, daß diese später zu gebende Erklärung sich der jetzigen Theorie zwanglos einfügen wird, und selbst wenn in irgend welchen Einzelheiten sich Modifikationen als notwendig erweisen sollten, bleibt die Aufstellung und Durcharbeitung dieser Theorie eine glänzende Geistestat. Ihre Bedeutung wird auch dadurch nicht gemindert, daß Goltz zuvor, nur durch unvollkommene physikalische Vorstellungen an der vollen Erkenntnis der Wahrheit gehindert, jenen Forschern mächtig vorgearbeitet hatte, indem er den Satz aufstellte, die Bogengänge seien neben eventueller Beteiligung am Hören Organe des Gleichgewichtssinnes.

Man hat auch späterhin noch vielfach von Bogengängen als Gleichgewichtsorganen gesprochen und durch die Aufstellung des Begriffs „statischer Sinn“ diese Auffassung gewissermaßen festgelegt. Mir erscheint diese Bezeichnung nicht zweckmäßig, weil sie die Bedeutung der im Labyrinth vertretenen Sinnestätigkeiten viel zu einseitig wiedergibt. In der oben gegebenen Darstellung der Labyrinthfunktion fand sich kaum ein Anlaß, überhaupt vom Gleichgewicht zu sprechen. Es soll damit nicht gesagt sein, daß das Labyrinth mit der Gleichgewichtsregulierung überhaupt nichts zu tun habe. Es gehört gewiß mit zu den Aufgaben des Labyrinths, den Körper

in den verschiedenen Ruhestellungen und während der Lokomotion äquilibriert zu erhalten. Seine Tätigkeit hierbei läßt sich auflösen in die Vermittelung der Lage- und Bewegungsempfindungen und die Auslösung der für die Gleichgewichtserhaltung nötigen Reflexe. Namentlich die letzteren aber kommen keineswegs dem Labyrinth als etwas Spezifisches zu, sondern es arbeitet in dieser Beziehung mit den Organen des sog. Muskelsinnes stets zusammen. Jede Störung des Körpergleichgewichtes beim Umsinken nach einer Seite hat abnorme Spannungsverhältnisse in den Muskeln, Sehnen, Fascien, Gelenken und der Haut zur Folge, wodurch die centripetalen Nerven dieser Gewebe erregt werden und reflektorisch auf Auslösung einer Gegenbewegung hinwirken, unterstützt allerdings vom Labyrinth. Daß jene nichtlabyrinthäre Gleichgewichtsregulierung indessen eine bedeutende Rolle spielt, beweisen die Taubstummen mit Labyrinthausfall, bei denen statische Störungen nur bei sorgfältiger Beobachtung festgestellt werden können.

Ewald. Charakteristisch für die Auffassung Ewalds ist, wie schon erwähnt, die Hervorhebung der tonuserhaltenden Wirkung des Labyrinths, des Tonusmangels nach Labyrinthausfall. Daneben sieht Ewald im Labyrinth zwei Sinnesorgane: das „Goltzsche Sinnesorgan“ (die Bogengänge) und den Otolithenapparat. Die Tätigkeit dieser Sinnesorgane denkt sich Ewald, soweit dies aus seinen Ausführungen zu entnehmen ist, wohl ungefähr in der auch von mir hier vertretenen Art. Hinfällig dürfte die Annahme Ewalds geworden sein, daß die Haare auf dem Epithel der Ampullen flimmern und hierdurch eine Strömung im Labyrinth erhalten werde. Wie Breuer besonders überzeugend gezeigt hat, kann man den in der Cupula zusammengebackenen Haaren Flimmerbewegung nicht zutrauen, und eine Strömung in dem engen Kanale würde selbst durch ganz bedeutend größere Kräfte nicht erzeugt werden, als sie ein solcher flimmernder Haarschopf bestenfalls liefern könnte.

Was den Labyrinthtonus betrifft, so darf seine Existenz als durch Ewald unzweifelhaft erwiesen gelten. Die Bedeutung des Labyrinths für die Gleichgewichtsregulierung dürfte vorzugsweise in dieser Tonusregulierung liegen. Mit zahlreichen anderen centripetalen Nerven zusammen erhält der *Nervus vestibularis* die Gesamtmuskulatur in der tonischen Spannung, die die Vorbedingung einer Stabilität des Körpers ist. Beginnt der Körper nach einer Seite hin zu fallen, so erregt die passive Bewegung die Ampullarorgane, es tritt eine Tonusverstärkung der dem Fall entgegenarbeitenden Muskeln ein. Neben diesen Reflexen labyrinthären Ursprungs haben die auf die Augenmuskeln begreiflicherweise stets das meiste Interesse erregt; ich stimme aber Ewald darin zu, daß es sich bei den ocularen Reflexen nur um einen besonders auffälligen Spezialfall des Reflexes auf einen großen Teil der Körpermuskulatur handelt.

Delage. Nicht ohne Interesse, aber meines Erachtens doch nicht sonderlich glücklich war der Versuch Delages, die Lage- und Bewegungstäuschungen, die nach der hier vorgetragenen Theorie im wesentlichen auf das Labyrinth als Entstehungsort zurückgeführt werden, aus Täuschungen über den Kontraktionszustand der Augenmuskeln zu erklären. Bei dem überaus engen Zusammenhang zwischen dem Augenmuskelapparat und dem Labyrinth ist es leicht verständlich, wenn die Delagesche Theorie nach

Inhalt und Beweisgang manchen Berührungspunkt mit der Mach-Breuerschen Theorie hat. So hat, wie oben erwähnt, Delage ja auch die Lage- und Bewegungsempfindungen speziell in ihrer Abhängigkeit von der Kopfhaltung studiert und ist ebenfalls zu dem Ergebnis gekommen, daß das Organ jener Empfindungen im Kopfe liegen müsse; speziell erkannte Delage, daß ungewöhnliche Kopfhaltung zu typischen Täuschungen auf dem Gebiet der Bewegungs- und Lageempfindungen führt.

Das Besondere aber an der Lehre Delages nun geht von seiner Beobachtung aus, daß alle Kopfverdrehungen, und nicht nur die mit Verlagerung der Kopfachsen gegen die Vertikale verknüpften, zu jenen Täuschungen führen. Drehung des Kopfes um die horizontal-sagittale Achse führt zu den bekannten Hueckschen Rollungen, Drehung um die horizontal-frontale Achse zu kompensatorischen Blickhebungen bzw. Senkungen; Delage behauptet nun, auch Drehungen um die vertikal-longitudinale Kopfachse führe zu unbeabsichtigten Mitbewegungen der Augen in der Orbita. Er hat damit unzweifelhaft recht, nicht aber damit, daß, wie in jenen beiden ersten Fällen, so auch mit der Kopfdrehung um die Vertikalachse Orientierungstäuschungen eintreten müssen. Für Delage sind die kompensatorischen Augenbewegungen Quelle der Orientierungstäuschungen und zwar auch derjenigen, die bei geschlossenen Augen oder im Dunkeln eintreten; er läßt die Kopfstellung nach der Augenstellung beurteilen.

Die experimentelle Grundlage dieser Auffassung erscheint nicht hinlänglich gesichert, die entscheidenden Versuche, welche die Unabhängigkeit der Lagetäuschungen von den Verlagerungen des Kopfes gegen die Vertikale und damit von einem durch Gravitation erregbaren Sinnesorgan dartun sollten, konnten weder von Breuer, noch von v. Cyon [1]), noch von mir bestätigt werden (s. o.).

Diese Abweichung der Anschauung Delages von der hier vertretenen erstreckt sich übrigens, wie schon nach diesen kurzen Bemerkungen ersichtlich, zunächst nur auf die Empfindungen der Lage, die ja in der Tat noch nicht mit der wünschenswerten Sicherheit evident nachzuweisen sind, und eine speziellere Analyse zurzeit noch nicht zulassen.

Was Delage als positive Anschauung über die Empfindungen der Progressivbewegung mitteilt, läßt sich im wesentlichen in folgendem Satze wiedergeben: „Die Empfindungen der Fortbewegung sind wahrscheinlich allgemein, hervorgebracht durch einen Druck der Flüssigkeiten des Organismus gegen die Gefäße und die Wandungen ihrer Behälter, durch einen Zug der verschiedenen Eingeweide an ihren Anheftungsstellen und an ihren eigenen Teilen, und vielleicht durch eine Wirkung auf die benachbarten nervösen Organe, wie z. B. die Plexus; mit einem Worte, durch eine Art von Ebbe- und Flutbewegung aller Teile unseres Organismus, welche eigene Beweglichkeit haben [2]).

---

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. 94 (1903). Erwähnt sei hier noch die Beobachtung Delages, daß beim Schaukeln in seiner „Schaukel ohne Drehung“ mit geschlossenen Augen die Schaukelebene eine scheinbare Verschiebung erleiden soll, wenn die (geschlossenen) Augen eine starke Seitenwendung ausführen, nicht aber, wenn der Kopf seitwärts gewendet wird. Diese und manche andere beachtenswerte Angabe Delages verdiente nachgeprüft zu werden. — [2]) Delage, l. c., S. 95.

Das sind Vermutungen, deren ernstere Erwägung mangels jeder experimentellen Grundlage hier nicht am Platze ist.

In der Beurteilung der Funktion der halbzirkelförmigen Kanäle steht Delage im wesentlichen auf dem Standpunkt, wie er in den obigen Ausführungen vertreten wurde; er sieht in ihnen Perceptionsorgane für die Drehbewegungen und zugleich „excitomotorische Organe", die bei Kopfdrehung Reflexe vor allem auf die Augenmuskeln auslösen.

v. Cyon. Einer der Autoren, die sich viel mit der Physiologie des Labyrinths beschäftigt haben, ist v. Cyon; das Labyrinth ist für ihn der Sitz des Raumsinnes. Durch die Ebenen der Bogengänge ist für ihn ein physiologisches Koordinatensystem gegeben, auf welchem unsere Raumvorstellung beruht. Die Täuschungen über unsere Lage im Raume bei schiefen Kopfhaltungen kommen durch die Verlagerung der Bogengangsebenen und eine dadurch bedingte Umwertung jenes Koordinatensystems zustande. Diese Richtungstäuschungen findet v. Cyon durch mannigfache intercurrente Reize sehr beeinflußbar, durch den Lichtreiz, Schallreiz (vor allem Musik bei Musikalischen), auch durch den „Willensreiz". Von der Richtung der Blicklinien sind die Richtungstäuschungen (Lagetäuschungen) nach v. Cyon nicht in dem Maße abhängig, wie Delage (s. o.) es annimmt, doch aber in der Intensität von ihnen beeinflußbar.

Der Mach-Breuerschen Theorie der Bogengangsfunktion und speziell des Erregungsmodus der Ampullarnerven steht v. Cyon durchaus ablehnend gegenüber, da er den normalen Erreger der Bogengänge in den Schallwellen sieht. Hierin liegt eine gewisse Ähnlichkeit mit der Anschauung Preyers (s. o., S. 790).

Die Art, wie v. Cyon sich das Bogengangsystem als Quelle der Raumvorstellung tätig denkt, ist mir, wie ich offen gestehen muß, nicht verständlich geworden, weshalb ich auf näheres Eingehen auf seine Theorie (wenn von einer solchen zu reden ist) verzichten muß.

VIII. Anhang. Die Zentralorgane der Bewegungs- und Lageempfindungen.

Entsprechend der Darstellung in den übrigen Kapiteln der Sinnesphysiologie in diesem Werk soll auch hier keine eingehende Behandlung der Zentralorgane gegeben werden, die beim Zustandekommen der Bewegungs- und Lageempfindungen von Bedeutung sind. Ein wenigstens ganz flüchtiges Eingehen auf sie wird sich indessen aus dem Grunde nicht vermeiden lassen, da es unerläßlich ist, einen Blick auf die Beziehungen des Kleinhirns zu diesem Sinnesgebiet zu werfen.

Erwähnt wurde schon oben, daß man vielfach versucht hat, die Erscheinungen, die man bei Tieren nach operativen Verletzungen am Labyrinth beobachtet, auf unbeabsichtigte und unvermeidliche Schädigungen oder Reizungen des räumlich so nahe benachbarten Kleinhirns zu beziehen.

Heutzutage kann man wohl sagen, daß manches von dem, was man für Erfolge der Labyrinthexstirpation oder namentlich der Durchschneidung des Acusticusstammes hielt, auf Nebenverletzungen am Kleinhirn beruhte. Mindestens ebenso bestimmt aber kann man sagen, daß das typische Bild

des totalen und des partiellen Ausfalls der Labyrinthfunktion jetzt, vor allem dank der Ewaldschen Untersuchungen, in solcher Reinheit und Schärfe vor uns liegt, daß man mit voller Sicherheit behaupten darf, daß als Erfolg des Eingriffes sich im Kleinhirn nur allenfalls solche degenerative Veränderungen einstellen können, die die notwendige Folge von Verletzungen der Nervenfasern sind, die etwa vom Labyrinth zum Kleinhirn gehen. Von einer völligen Klarheit über die Beziehungen zwischen Labyrinth und Kleinhirn sind wir freilich noch weit entfernt.

B. Lange[1]) hat die Frage von der anderen Seite angegriffen und gefragt, inwieweit die nach Kleinhirnverletzungen gefundenen Störungen (Zwangsbewegungen usw.) auf Verletzungen der zentralen Acusticusendigungen zurückzuführen sind. Lange kam zu dem Ergebnis, daß das Kleinhirn nicht als Zentralorgan der Labyrinthfunktion aufgefaßt werden könne. Als besonders wichtig betrachten Lange wie Ewald die Tatsache, daß bei einer beiderseitig labyrinthlosen Taube die Entfernung eines Kleinhirnteils ebenso heftige Störungen bewirkt, als bei einer vorher intakten Taube. Das beweist für die Hauptfrage nicht viel. Zu bemerken ist überdies, daß bei Tauben mit beschädigtem Kleinhirn nach einseitiger Labyrinthexstirpation sofort, und nicht erst nach längerer Zeit, wie sonst, die Kopfverdrehung auftritt (Stefani[2]), Lange).

Stefani und Weiß[3]) haben übrigens nach Labyrinthexstirpation degenerative Veränderungen der Kleinhirnzellen beobachtet, und zwar beiderseitig nach nur einseitiger Operation. Diese Angaben wurden dann von verschiedenen Seiten bestritten (u. a. von Spamer[4]). Neuerdings hat indessen Stefani[5]) seine Angaben von neuem bekräftigt, indem er nach den Methoden von Marchi und Nißl den Eintritt der Degenerationserscheinungen genau verfolgte. Er fand wiederum Degeneration im Kleinhirn (und auch in verlängertem Mark), und zwar beiderseitig. Die Purkinjeschen Zellen fanden sich nur in den Fällen ergriffen, in denen als Folge der Labyrinthoperation schon die Kopfverdrehung eingetreten war. Am meisten betroffen ist die weiße Substanz der hinteren Windungen. Die Entartungen im verlängerten Mark betreffen die vestibulare (mediale) Acusticuswurzel, auch im *Tuberculum acusticum*, der *Substancia reticulata*, der Abducenswurzel und in den *Fibrae arcuatae* zeigen sich Degenerationen.

Im Abducenskern zeigten sich nach Stefani die Degenerationen auch in solchen Fällen, in denen die Kopfverdrehung noch fehlte.

Beachtenswert ist übrigens auch die Bemerkung von Lui[6]), daß das Kleinhirn sich bei den verschiedenen Tierklassen immer zu der Zeit fertig entwickelt, wo die Tiere laufen lernen.

Nach diesen Erfahrungen wird man der Formulierung Stefanis betreffs der Kleinhirnfunktion zustimmen dürfen, wonach dieses ein Zentralorgan ist, dessen Tätigkeit hauptsächlich durch die Impulse von seiten des Labyrinths angeregt und unterhalten wird und dessen Funktion im wesentlichen in der Erhaltung des muskulären Tonus

[1]) Arch. f. d. ges. Physiol. **50** (1891). — [2]) Fisiologia dell' encephalo, Milano 1886 u. Accad. di Ferrara, 1874 u. 1879. — [3]) Accad. di Ferrara, 1877. — [4]) Arch. f. d. ges. Physiol. **21** (1880). — [5]) Arch. ital. biol. **40** (1903). — [6]) Riforma Medica, No. 20, 1894.

besteht, der zur Erzielung stabiler Körperhaltung im normalen Gleichgewicht notwendig ist. Es wird nur hinzuzufügen sein, daß das Kleinhirn außer aus dem Labyrinth auch sehr wichtige Erregungen von anderen sensiblen Bahnen beziehen muß, nicht zum wenigsten wohl von den sensiblen Muskel- und Gelenknerven, durch Vermittelung der Hinterstränge. Diese Auffassung ist sonst mit der Lucianischen bezüglich der Kleinhirnfunktion wie mit der Ewaldschen von der Funktion des „Tonuslabyrinths" wohl vereinbar [1]).

Die Kleinhirnrinde als ein Zentralorgan für die Bewegungs- und Lageempfindungen in gleichem Sinne zu betrachten, wie es die Hinterhauptsrinde für die Gesichtsempfindungen ist, geht sicherlich nicht an. Die Bedeutung des Labyrinthes ist indessen mit seiner, reflektorisch zu denkenden, Wirkung als tonuserhaltendes Organ nicht erschöpft, sondern es vermittelt ja auch Empfindungen. Ob und wo etwa in der Hirnrinde ein wahres Rindenfeld für diese Funktion liegt, steht zurzeit nicht fest, wenngleich seine Existenz als höchst wahrscheinlich anzunehmen ist.

Für die Empfindungen der Lage und Bewegung der Glieder oder, allgemein gesagt, der einzelnen beweglichen Körperteile liegt das Rindenfeld, wie als sicher angenommen werden kann, in den zugehörigen Foci der Zentralwindungen, der Munkschen Fühlsphäre. Beweisender als die zahlreichen hierauf deutenden Tierversuche, die ich hier übergehe, sind die Erfahrungen am Menschen, wie sie F. Krause [2]) bei Exstirpation von Rindenfeldern wegen Rindenepilepsie gemacht hat. Unter den Wirkungen dieser Operation interessiert hier speziell der Verlust der „stereognostischen" Funktion der Hand, deren Rindenfeld exstirpiert wurde (nachdem es durch faradische Reizung aufgesucht worden war). Die Patienten können, obgleich die Sensibilität und Motilität des Gliedes erhalten ist, die Form eines mit der Hand befühlten Körpers nicht mehr erkennen, wenn die Augen verschlossen sind; sie können beispielsweise einen Würfel nicht mehr als solchen erkennen. Auf analogen Störungen, die komplizierter sind als einfache Sensibilitätsabstumpfung, beruht zweifellos auch das abnorme Verhalten der Tiere, bei denen das Rindenfeld einer Extremität entfernt ist.

---

[1]) Näher kann hier auf die Bedeutung des Kleinhirns für den Muskelsinn nicht eingegangen werden; vgl. den Abschnitt über Kleinhirn (Bd. IV dieses Handbuchs), sowie aus der Literatur die Arbeiten von Lussana, Fisiologia e patologia del cervelletto, Padova 1885; Luciani, Il cervelletto, Firenze 1891; Stefani, Fisiologia del encephalo, Milano 1886; Lewandowsky, Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1903; Sergi, Arch. ital. biol. 1902; Duceschi e Sergi, Archivio di fisiol. **1**, (1904). — [2]) „Hirnchirurgie", Deutsche Klinik, 1904.